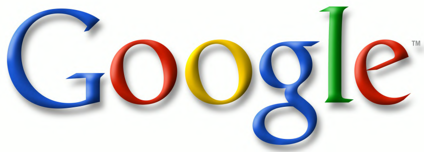
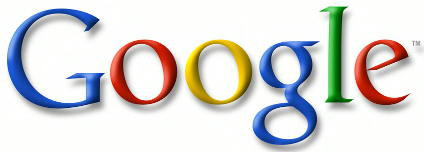
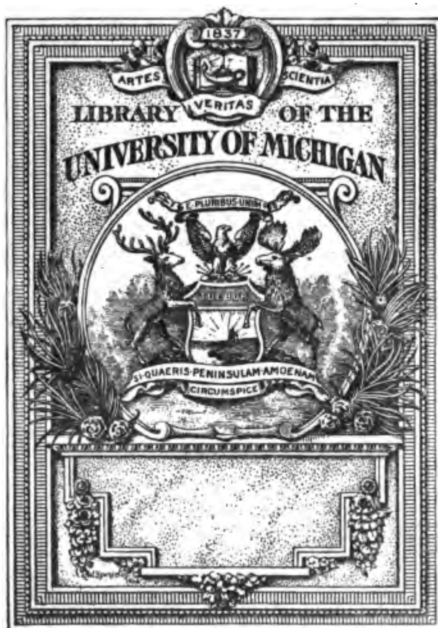



Google


1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
E PLURIBUS UNUM
TUEBOR
SI·QUAERIS·PENINSULAM·AMOENAM
CIRCUMSPICE

(
/
. F

BIBLIOTHEK

GEOGRAPHISCHER HANDBÜCHER

HERAUSGEGEBEN VON

PROF. DR. FRIEDRICH RATZEL.

Unter Mitwirkung von

Professor Dr. **Georg v. Boguslawski**, weil. Sektionsvorstand im Hydrographischen Amt der Kaiserl. Admiralität in Berlin; Professor Dr. **Carl Börgen**, Vorstand des Kaiserlichen Observatoriums in Wilhelmshaven; Dr. **Ed. Brückner**, Professor an der Universität in Bern; Professor Dr. **Oscar Drude**, Direktor des Botanischen Gartens in Dresden; Dr. **F. A. Forel**, Professeur à l'Université de Lausanne in Morges; Dr. **Karl v. Fritsch**, Professor an der Universität in Halle; Dr. **Siegmund Günther**, Professor an der Technischen Hochschule in München; Dr. **Ernst Hammer**, Professor an der Technischen Hochschule in Stuttgart; Dr. **Julius Hann**, Professor an der Wiener Universität und Redakteur der Zeitschrift für Meteorologie; Dr. **Albert Heim**, Professor am Eidgenössischen Polytechnikum und der Universität in Zürich; Dr. **Otto Krümmel**, Professor an der Universität und Lehrer an der Marine-Akademie in Kiel; Dr. **Albrecht Penck**, Professor an der Universität Wien; Professor Dr. **G. Pfeffer**, Kustos für Zoologie am Naturhistorischen Museum in Hamburg; Professor Dr. **Adolf Schmidt** in Gotha.

STUTTGART.

VERLAG VON J. ENGELHORN.

1901.

HANDBUCH

DER

SEENKUNDE.

ALLGEMEINE LIMNOLOGIE

VON

DR. F. A. FOREL,

PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT LAUSANNE.

Mit einer Tafel und 16 Abbildungen.

STUTTGART.

VERLAG VON J. ENGELHORN.

1901.

Druck der Union Deutsche Verlagsgesellschaft in Stuttgart.

Vorwort.

Als vor einer Reihe von Jahren der Herausgeber der geographischen Handbücher, Herr Prof. Dr. F. Ratzel, sich mit dem Ansuchen an mich wandte, ihm für seine Sammlung ein Handbuch der Seenkunde zu schreiben, äußerte ich Bedenken, daß die Wahl gerade auf mich fallen sollte. Ein Handbuch oder Lehrbuch soll unparteiisch, objektiv sein, methodisch nach Plan und Anlage. Seine verschiedenen Teile sollen gleichmäßig und harmonisch ausgearbeitet sein, nichts Wesentliches an Einzelheiten übergehen, aber auch nicht in parteiischer Breite bei den Liebhabereien des Autors verweilen. Die Behandlung des Stoffes soll nach allen Richtungen kritisch und wohl abgewogen sein. Diesen Anforderungen kann gerade derjenige nicht wohl genügen, der, wie ich, an der Begründung und am Ausbau der darzustellenden Wissenschaft mitgewirkt, sich an der Erörterung der zu behandelnden Probleme beteiligt und zu theoretischen Fragen eine scharf bestimmte Stellung eingenommen hat. Mein Verhältnis zur Seenkunde ist viel zu persönlich und subjektiv, als daß ich eine in jeder Hinsicht objektive Darstellung derselben geben könnte. Das gab ich dem verehrten Herausgeber der geographischen Handbücher zu bedenken; ich wies darauf hin, daß ein Geograph, der vielleicht nie seinen Fuß in ein Boot gesetzt und nie ein Dredgenetz ausgeworfen, dafür aber über die verschiedenen Teile der physikalischen Geographie, so auch über die Seenkunde doziert hat, weit besser zu solcher

Arbeit geeignet sei als ich. Denn er überschaut objektiv von höherer Warte das Material an Beobachtungen und theoretischen Schlüssen, während mir, der ich viel zu sehr in zahlreichen Fragen der Seenkunde engagiert bin, ruhige Unparteilichkeit abgehen könnte, die bei der Niederschrift eines Handbuches erstes Erfordernis ist.

Der Herausgeber teilte meine Bedenken nicht.

So übernahm ich denn, wenn auch nach längerem Zögern, die mir zugewiesene Aufgabe, vielleicht sehr zum Schaden des Lesers, dem die aus den angegebenen Verhältnissen entspringenden Mängel meines Buches nicht entgehen werden. Im voraus möchte ich ihn daher um Nachsicht bitten, wenn es dem Verfasser nicht gelungen ist, seine Persönlichkeit ausreichend abzustreifen und unparteiisch über die Untersuchungen anderer, wie über seine eigenen Untersuchungen zu berichten, mit einem Wort, wenn das Buch nicht ein völlig objektives Handbuch der allgemeinen Seenkunde geworden ist.

Ich kann meine Seenkunde nicht der Oeffentlichkeit übergeben, ohne zwei Freunden warm zu danken, deren Mitarbeit dem Werk die Form gab, in der es nunmehr vorliegt. Herr Dr. E. Wilczek, Professor der Botanik an der Universität Lausanne, hat die französische Niederschrift ins Deutsche übertragen, Herr Dr. Ed. Brückner, Professor der Geographie an der Universität Bern, das deutsche Manuskript besonders im Hinblick auf die präzise Wiedergabe der zum Teil komplizierten Probleme durchgesehen und in manchen Punkten, so in bibliographischer Hinsicht, ergänzt. Wenn mein Buch zu stande gekommen ist und nunmehr als bescheidenes Bändchen in die Engelhornsche Serie geographischer Handbücher eintritt, so danke ich das in erster Reihe auch der Mitwirkung meiner beiden Freunde und Kollegen.

Morges am Genfer See, im Juli 1900.

F. A. Forel.

Inhalt.

Erster Teil.

Das Seebecken.

Zweiter Teil.

Das Wasser des Sees.

I. Kapitel.

Hydrologie (Wasserhaushalt).

II. Kapitel.

Hydraulik.

III. Kapitel.

Chemie des Wassers.

IV. Kapitel.

Thermik.

V. Kapitel.

Optik.

VI. Kapitel.

Biologie.

Anhang.

Einleitung.

I. Allgemeine Limnologie.

Von drei Gesichtspunkten aus läßt sich jede naturgeschichtliche Disziplin behandeln: die beschreibende Methode vereinigt die einzelnen Beobachtungen über ein Objekt zu Monographieen; die vergleichende Methode stellt die durch die Monographieen von verschiedenen Objekten derselben Art bekannt gewordenen Thatsachen zusammen und gruppiert sie; die allgemeine Methode endlich verallgemeinert die Thatsachen und stellt Gesetze und Theorieen auf. So geht auch die physische Geographie vor, ist sie doch selbst nur eine Synthese der naturgeschichtlichen Disziplinen. Als Zweig derselben muß auch die Limnologie nach drei Richtungen als beschreibende, als vergleichende und als allgemeine Limnologie behandelt werden.

Ich habe vor mehreren Jahren die Limnologie des Genfer Sees monographisch dargestellt [1]). Dabei bin ich auf die zahlreichen Probleme der allgemeinen Limnologie geführt worden, die in der Folge behandelt werden sollen. Logischerweise hätte auf jene Monographie eine vergleichende Limnologie folgen sollen; man hätte die zahllosen an den einzelnen Seen der ganzen Erde angestellten Beobachtungen sammeln, analysieren und vergleichend gruppieren sollen. In der That wäre eine solche vergleichende Sammlung gerade für diesen Zweig der Naturwissenschaften besonders wichtig, hat doch die Seen-

1) Le Léman, Monographie limnologique. Lausanne, Tom. I. 1892. Tom. II. 1895. Tom. III im Druck.

forschung in den letzten 20 Jahren eine Fülle von Einzelbeobachtungen gezeitigt, wie kaum eine andere naturgeschichtliche Disziplin. Allein gleichwohl durfte ich persönlich mich nicht daran wagen, schon weil ich von jeder größeren geographischen Bibliothek allzuweit entfernt bin. Ich muß diese verdienstliche Arbeit des Sammelns einem anderen überlassen und werde der erste sein, der das Erscheinen eines Handbuches der vergleichenden Limnologie freudig begrüßt, das die in der weitschichtigen geographischen und in der gesamten naturwissenschaftlichen Litteratur zerstreuten Beobachtungen zu einem wohlgeordneten Ganzen vereinigt.

Im vorliegenden Werke beschränke ich mich auf die allgemeine Limnologie, die allgemeine Seenkunde, d. h. auf eine Darstellung sämtlicher auf die Seen im allgemeinen bezüglichen Beobachtungen, Gesetze und Theorieen. Der See soll als geographische Einheit behandelt werden und zwar sowohl für sich, wie auch in seinen Beziehungen zu seiner äußeren Umgebung. Wir werden die Struktur des Seebeckens zu betrachten haben, die Zusammensetzung des Wassers, die Kräfte, die das Wasser bewegen, die toten und lebenden Fremdkörper, die in ihm auftreten, die Beziehungen des Sees zu der auf ihm ruhenden Luft und zu den Gesteinen, die sein Becken aufbauen.

Wir werden uns dabei hauptsächlich auf die Resultate der Untersuchungen stützen, die an den Seen der gemäßigten Zone Europas und Nordamerikas angestellt worden sind; denn nur diese Seen sind nach allen Richtungen hin genügend studiert. Doch werden wir, soweit es uns möglich ist, auch die von Seen anderer Regionen vorliegenden vereinzelten Beobachtungen zu Rate ziehen.

II. Definitionen.

Als See bezeichnet man eine allseitige geschlossene, in einer Vertiefung des Bodens[1]) be-

[1]) Wanne nach Penck, Morphologie der Erdoberfläche II. S. 203. Stuttgart 1894.

findliche, mit dem Meer nicht in direkter Kommunikation stehende stagnierende Wassermasse.

Diese Definition ist erschöpfend; sie umfaßt gleichzeitig das Seebecken wie das darin enthaltene Wasser. Es gibt keinen See, auf den sie nicht anwendbar wäre. Ausgeschieden werden durch sie alle irgend mit dem Ozean kommunizierenden und von diesem abhängigen Wassermassen, wie Lagunen, Aestuare, Mittelmeere etc. Eine solche Ausscheidung ist besonders aus biologischen Gründen nötig: tierische und pflanzliche Organismen des Meeres können sich ungehindert in alle mit dem Meer direkt kommunizierenden Gewässer ausbreiten; ihre Einwanderung in Seen kann hingegen nur auf indirektem Wege erfolgen.

Aber auch das Weltmeer selbst ist durch die Definition aus der Reihe der Seen ausgeschieden. Im Gegensatz zu dem unbegrenzten allumschließenden Ozean ist jeder See begrenzt und allseitig umschlossen.

Die Größenverhältnisse spielen in unserer Definition keine Rolle. Jeder Wassertümpel ist ein See im kleinen und als solcher der Schauplatz limnologischer Erscheinungen in verkleinertem Umfang. In der Praxis bezeichnet man allerdings solche Tümpel nicht als Seen und beschränkt den Ausdruck See auf größere Wasserflächen. Doch ist es schwer, eine untere Grenze der Größe anzugeben, die jene kleinen Gewässer von den Seen scheiden würde. Manche Bergseen nehmen nur eine Fläche von einigen Tausenden von Quadratmetern ein und müssen doch unstreitig als echte Seen bezeichnet werden.

Zur gleichen Gruppe geographischer Erscheinungen wie die Seen gehören auch die Weiher und Sümpfe; sie bilden zusammen mit den Seen eine fortlaufende Reihe, deren Glieder um so schwieriger auseinander zu halten sind, als das eine aus dem anderen entsteht, wie wir später sehen werden. Aus Zweckmäßigkeitsgründen und unter Vorbehalt späterer Begründung werden wir die Glieder dieser Reihe wie folgt unterscheiden:

Seen im engeren Sinn sind solche Seen, die eine

centrale Region besitzen, in welcher die Tiefe des Wassers genügend groß ist, um das Eindringen der littoralen Flora auszuschließen;

Weiher *(étangs)* sind Seen von so geringer Tiefe, daß die submerse littorale Flora überall Fuß fassen kann;

Sümpfe endlich sind Weiher von so geringer Tiefe, daß sich überall die durch ihre über den Wasserspiegel emporreichenden Triebe ausgezeichnete Sumpfflora entwickeln kann.

Unserer Definition gemäß ist ein See eine in einer Vertiefung des Landes enthaltene Wassermasse. Entsprechend werden wir erst den Behälter, das Seebecken, betrachten und dann das darin enthaltene Wasser.

III. Geographische Elemente.

Für die limnologischen Verhältnisse eines Sees sind folgende geographische Elemente von Bedeutung:

1. Die Lage im allgemeinen ist maßgebend für das Klima der Gegend, in welcher der See liegt.

2. Die geographische Breite beeinflußt die Temperaturverhältnisse des Sees. Je näher dem Aequator, desto wärmer wird er *caeteris paribus* sein.

3. Die absolute Höhe des Seespiegels über dem Meer ist ebenfalls für die Thermik des Sees von Bedeutung. Je höher er liegt, desto kälter wird unter sonst gleichen Umständen das Wasser sein, desto länger wird seine Oberfläche im Winter gefroren bleiben. In beträchtlichem Maße werden ferner Fauna und Flora von der absoluten Höhe beeinflußt. In den Seen der Ebene werden aktive und passive Wanderungen viel leichter bewerkstelligt als in Bergseen.

4. Das Areal des Sees ist für die Größe und Kraft der Bewegungen seiner Wassermassen von einschneidender Bedeutung. Je größer der See, desto stärker sind seine Wellen und Strömungen. Das Ausmaß der Wasserstandsänderungen dagegen steht zur Ausdehnung des Sees im umgekehrten Verhältnis. Die Verdunstung

und die direkte Kondensation sind auf großen Seen absolut größer, aber relativ kleiner als auf kleinen Seen.

5. Die Tiefe des Sees beeinflußt die Bewegungen des Wassers im Wellenschlag und in den Seiches.

Die maximale Tiefe ist für gewisse biologische Erscheinungen von Wichtigkeit und zugleich für die Frage nach der Genesis des Sees von hoher Bedeutung.

Die mittlere Tiefe des Sees, die man erhält, indem man das Volumen des Sees durch seine Oberfläche dividiert, gibt, verglichen mit der maximalen Tiefe, Anhaltspunkte über die allgemeine Form des Seebeckens. Wäre die Gestalt des Sees die eines Hohlkegels (Trichters), so wäre sein Volumen gleich der Oberfläche, multipliziert mit einem Drittel der maximalen Tiefe, und seine mittlere Tiefe wäre ein Drittel der maximalen. Dieses Verhältnis trifft nur selten zu. Meistens entspricht die mittlere Tiefe der Hälfte oder einem noch größeren Bruchteil der maximalen. Daraus ergibt sich, daß ein See meist einen Kegel mit abgestumpfter Spitze, einen Kegelstumpf darstellt. In der That besitzen die meisten Seen in ihrer tiefsten Region eine zentrale, durch Aufschüttung von Alluvionen entstandene Ebene, so daß die ideale Kegelgestalt in den meisten Fällen sehr stark modifiziert erscheint.

6. Das Volumen einer Wassermasse beeinflußt deren Chemismus und Thermik [1]) in hohem Grade. Je größer der See, desto unbedeutender sind die Schwankungen in den chemischen und thermischen Verhältnissen. Das Volumen des Sees ist ferner von Einfluß auf die Größe seiner tierischen und pflanzlichen Bewohner.

7. Die Größe des Einzugsgebietes beeinflußt die Wassermenge der Zuflüsse des Sees derart, daß diese *caeteris paribus* der Größe des Einzugsgebietes proportional ist. Vom Verhältnis der Seeoberfläche zur Wassermenge der Zuflüsse, oder kurz gesagt, zur Größe des Einzugsgebietes hängt das Ausmaß der Wasserstandsschwankungen des Sees ab. Das Verhältnis des Vo-

---

[1]) So sagen wir abgekürzt statt „chemische“ und „thermische“ Verhältnisse.

lumens des Sees zur Wassermenge seiner Zuflüsse bestimmt das Ausmaß der chemischen Variationen und kann für die thermischen Schwankungen von Bedeutung sein.

8. Die Wasserführung der Zuflüsse, und zwar die mittlere wie auch die kleinste und die größte, ist ein wichtiger Faktor für die limnimetrischen, thermischen und chemischen Schwankungen des Sees.

9. Die Lage eines Sees im Laufe eines Flusses, der ihn durchströmt (Flußseen), oder am Ende eines Flusses, der ihn ernährt (Endseen), beeinflußt seine organische Bevölkerung insofern, als von ihr die größere oder geringere Leichtigkeit abhängt, mit welcher aktive und passive Migrationen von Pflanzen und Tieren stattfinden können.

IV. Meteorologische Faktoren.

Folgende lokalklimatische Faktoren sind für die Naturgeschichte eines Sees von Wichtigkeit:

1. Die Lufttemperatur; sie regelt den an der Oberfläche des Sees stattfindenden Wärmeaustausch.

2. Die Hydrometeore, und zwar:

a) Die absolute Feuchtigkeit der Luft; sie bestimmt den Taupunkt; von dem Verhältnis des Taupunktes zur Oberflächentemperatur des Sees hängen Verdunstung und Kondensation ab.

b) Die relative Feuchtigkeit; sie bestimmt den Grad der Bewölkung und die Häufigkeit der Niederschläge.

c) Die Bewölkung ist bestimmend für die Wärmeeinstrahlung von der Sonne zum See und für die Wärmeausstrahlung von der Oberfläche des Sees in die Atmosphäre und in den Weltenraum.

d) Die Niederschlagsverhältnisse; von ihnen hängt die Speisung des Sees ab.

3. Die Winde; sie sind von größtem Einfluß auf die Bewegungen des Wassers im See, den Wellenschlag und die Strömungen. Zugleich sind sie von eminenter

Bedeutung für die klimatischen Verhältnisse der ganzen Region. In Betracht kommen folgende Winde:

a) Allgemeine Winde, die Luft aus fernen Gegenden heranbringen.

b) Stürme, wie sie Gewitter und Böen begleiten; sie stören plötzlich die Ruhe der Atmosphäre.

c) Lokale Winde (franz. *brises*), die einen Luftaustausch zwischen verschiedenen Teilen der Gegend, in der der See liegt, verursachen. Sie sind direkt durch die Anwesenheit des Sees bedingt, der thermisch ganz anders auf die Atmosphäre wirkt, als das umgebende Land. Nachts wehen im Sommer Landwinde in centripetaler Richtung vom Lande her gegen den See, tagsüber Seewinde in centrifugaler Richtung vom See gegen das Land hin. Im Winter dominieren die Landwinde auch am Tage.

4. Lokale Schwankungen des Luftdrucks; sie sind die wesentlichste Ursache der sogenannten Seiches.

V. Erforschung der Seen.

Die wissenschaftliche Erforschung der Seen hat in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts einen gewaltigen Aufschwung genommen, dank dem Eifer, mit dem sich die Naturforscher gerade dieser Disziplin zuwandten. Die Zahl vereinzelter wie systematischer Beobachtungen, monographischer Beschreibungen und theoretischer Untersuchungen hat sich in kurzer Zeit vervielfacht. Dieses gegenwärtig so rege Interesse an der Seenkunde beruht besonders auf drei Ursachen.

Es ist erstens eine allgemeine Vertiefung der Seenstudien erfolgt. Lange Zeit gab es auf dem Gebiet der Seenforschung nur vereinzelte, gleichsam zufällige Untersuchungen. Der Physiker beobachtete die Temperatur des Wassers, der Hydrotechniker maß den Wasserstand und verfolgte dessen Aenderungen, der Zoologe und der Botaniker sammelten, studierten und beschrieben jeder für sich, unabhängig von einander,

Seetiere und Seepflanzen, ohne von gemeinsamen Gesichtspunkten ausgehend, den Versuch zu machen, zu allgemeinen Resultaten zu gelangen. Da kamen die fruchtbaren Jahre, in denen die Ozeanographie sich dadurch so mächtig entwickelte, daß sie die systematische Durchforschung des Ozeans nach allen Richtungen der Wissenschaft gleichzeitig unternahm und jede einzelne Thatsache im Zusammenhang mit allen anderen betrachtete, die eine zur Erklärung der anderen benutzend. Seitdem in dieser Weise die Ozeanographen in jeder Hinsicht allgemeine und vollständige Naturgeschichte zu treiben begonnen, seitdem datiert auch der Aufschwung der Limnologie: sie wandte die gleichen Mittel und Methoden an, um auch ihrerseits zu schönen Resultaten zu gelangen. Das Erscheinen von Wyville Thomsons epochemachendem Werk „The Depths of the Sea“ im Jahre 1873 bezeichnet den Beginn der Periode des Aufschwungs in der Ozeanographie; die Challenger-Expedition hat gleich darauf der Ozeanographie die allgemeine Anerkennung als Wissenschaft gebracht.

Gleichzeitig [1]) entwickelte sich auch die Limnologie, allerdings in bescheidenerem engeren Raume, als ihre große Schwester, deren Ergebnisse sie mannigfach benutzte. Wenn sie auch nicht die weltumfassenden Resultate der Ozeanographie aufzuweisen hat, so hat vielleicht doch auch umgekehrt sie selbst zur Weiterentwickelung der großen Schwesterdisziplin etwas beigetragen, stehen doch die limnologischen Untersuchungen der Laboratoriumsarbeit näher und sind zugleich wegen der Kleinheit des Untersuchungsfeldes der experimentellen Methode zugänglicher, als die ozeanographischen. Wie dem auch sei, jedenfalls waren die limnologischen Untersuchungen für die Geographie sehr fruchtbar.

Ein zweites Moment, das überaus auf den Aufschwung der Seenforschung hinwirkte, ist der Individualismus der Seen. Während das Meer unbegrenzt ist und alle seine Teile in ununterbrochenem, innigem Zusammen-

[1]) F. A. Forel, Introduction à l'étude de la faune profonde du lac Léman. Bull. Soc. Vaud Sc. Nat. X. 468. Lausanne 1869.

hang miteinander stehen, bildet jeder See ein in sich abgeschlossenes, scharf umgrenztes Ganze. Das Meer ist ein Makrokosmus, der See ein Mikrokosmus. Jeder See ist etwas für sich, eine Einheit und als solche der einheitliche, wegen der Kleinheit des Feldes leicht zu überblickende Schauplatz der Wirkungen sämtlicher Naturkräfte. Die Bedeutung dieser Thatsache ist aus jedem Kapitel der Limnologie deutlich zu ersehen. Die Wirkungen und Wechselwirkungen der verschiedenen Naturkräfte lassen sich hier besser abschätzen, messen und berechnen, als im Ozean oder in irgend einem geographischen Gebiet des Festlandes: jeder See trägt die Merkmale eines geographischen Individuums so scharf ausgeprägt an sich, wie wir sie an keinem anderen geographischen Objekt treffen. Jeder See ist ein Organismus für sich, jeder hat seine Eigentümlichkeiten, seine besondere Geschichte in der Vergangenheit und Gegenwart, ein jeder verdient eine spezielle Beschreibung. Daher der Reiz und auch der wissenschaftliche Wert, den das Studium der Seen im allgemeinen und dasjenige eines jeden Sees im besonderen bietet.

Endlich noch ein drittes Moment!

Der größte Teil der Wassermasse des Sees war eigentlich vor dem Erscheinen der Arbeiten unserer Generation völlig eine *Terra incognita.* Das Auge vermochte nur einige Meter tief in die wenig durchsichtigen Wassermassen einzudringen. Die Seetiefen waren unbekannt, bis die Anwendung sinnreicher Methoden sie unserer Beobachtung zugänglich machte. Das Lot, an das man Thermometer und photographische Apparate, Schöpfflaschen, Dredgenetze, Schleppnetze aller Art hängte, wurde in der Hand des modernen Naturforschers zu einem Instrument, vermittelst dessen er die Geheimnisse einer Welt entschleierte, die unseren Vorfahren gänzlich unbekannt geblieben war.

Die machtvolle Anziehung, wie sie ein neuentdecktes, bisher unbekanntes Gebiet stets ausübt, war es, die der Seenkunde zahlreiche Mitarbeiter gewann. Durch das Zusammenarbeiten einer nach Hunderten zählenden

Schar von Forschern hat sich die Limnologie zum Rang einer selbständigen Wissenschaft erhoben.

Suchen wir zu präzisieren, welche Stelle dieser Zweig der Geographie inmitten der anderen einnimmt.

Die Geographie ist die Wissenschaft von der Erde in ihrer dreifachen Zusammensetzung aus Lithosphäre, Hydrosphäre und Aerosphäre. Das Studium der Hydrosphäre speziell fällt der Hydrographie zu. In dreierlei Art tritt das flüssige Wasser auf der Erde auf, im Meer, in den Seen und in den Flüssen. Entsprechend gliedert sich die Hydrographie in drei Unterdisziplinen:

Die Ozeanographie beschäftigt sich mit dem unbegrenzten, allseitig zusammenhängenden Meer.

Die Limnologie behandelt die auf dem Land zerstreut, gleichsam inselförmig auftretenden Teile der Hydrosphäre, die Seen.

Die Rheologie endlich studiert das fließende Wasser der Landflächen, die Quellen, Bäche, Flüsse und Ströme.

Rechnen wir zur Hydrosphäre auch die in festem Aggregatzustand befindlichen Wassermassen der Landflächen, die Gletscher, so gesellt sich als vierte Unterdisziplin die Glaciologie dazu.

Die Limnologie[1]) ist also ein Zweig der Hydrographie, die ihrerseits einen Zweig der Geographie bildet.

---

[1]) Ich hätte eigentlich den Ausdruck Limnographie dem etwas anmaßenden Worte Limnologie vorgezogen. Allein das Wort Limnographie ist schon vergeben: man bezeichnet als Limnographen den Apparat, mit dem man den Wasserstand eines Sees mißt, und mit Limnographie die Lehre von den Wasserstandsänderungen der Seen; ich war daher, um Verwechselungen vorzubeugen, gezwungen, den oben genannten, heute ganz allgemein eingebürgerten Ausdruck zu wählen.

Erster Teil.

Das Seebecken.

Folgende Punkte sind bei der Betrachtung eines Seebeckens, d. h. einer mit ruhendem Wasser erfüllten Wanne zu berücksichtigen:

a) seine Lage; es kann über der Erdoberfläche oder unter der Erdoberfläche liegen (oberirdische oder offene und unterirdische Seen);

b) seine Entstehung;

c) die Umwandlungen oder Metamorphosen, die es im Laufe der Zeit erfahren hat;

d) seine Eigenschaften.

I. Ober- und unterirdische Seen.

Je nach ihrer Lage kann man die Seen in zwei große Klassen teilen.

a) Seen, die auf der Erdoberfläche frei zu Tage liegen und die wir nach dem Vorgange Lombardinis[1]) offene Seen nennen wollen. Hierher gehört die große Mehrzahl der Seen.

b) Unterirdische Seen, stagnierende Wassermassen, die Wannen am Boden von Höhlen erfüllen. Solche Höhlenseen sind meistens nichts anderes als seenförmige Verbreiterungen unterirdischer Flußläufe, die sich infolge von Einstürzen bildeten oder bei Verlegung des

---

1) Lombardini, Della natura dei laghi. Mem. Ist. Lombardo II. 1845. 393.

Flußbettes zurückblieben. Sie besitzen niemals größere Ausdehnung und größere Tiefe. Obgleich sie in verschiedener Hinsicht interessant sind, können wir sie hier nicht behandeln, da sie nicht getrennt von den unterirdischen Flüssen betrachtet werden dürfen, denen sie ihre Entstehung verdanken und deren integrierenden Bestandteil sie bilden. Es fehlt ihnen zum Teil der bei den offenen Seen so stark hervortretende individuelle Charakter, der diesen in geographischer Hinsicht eine Sonderstellung einräumt. Daher gehen wir hier auf die Höhlenseen nicht näher ein.

II. Bildung des Seebeckens und Entstehung der Seen.

Die an der Erdoberfläche vorkommenden Wannen[1]) *(cuvettes)*, in denen sich Wasser ansammelt, können sehr verschiedener Natur sein. Je nach ihrer Genesis lassen sich Wannen unterscheiden, die durch Einbruch oder Einsinken von Gesteinsmassen entstanden sind, ferner Wannen, die durch Abtragung von Gesteinsmassen sich bildeten, endlich Wannen, die durch Bildung eines Dammes, der das Wasser staute, entstanden sind. Entsprechend sind die Vorgänge, die zur Seebildung führen, entweder tektonische Vorgänge, die die Schichten der Erdrinde dislozieren, oder Erosionswirkungen, die die Erdschichten abtragen, oder Akkumulationsvorgänge, die inmitten eines Flusses einen Damm aufwerfen und so den Abfluß des Wassers hindern. Oft ist ein See komplexer Entstehung: er entstand durch das Zusammenwirken zweier oder mehrerer der genannten Vorgänge.

Jeder See hat seine eigene, von derjenigen seiner Nachbarn oft ganz verschiedene Geschichte. Diese Ge-

---

[1]) Der Ausdruck „Wanne" soll hier in einem ganz bestimmten, begrenzten Sinne angewandt werden. Unter „Wanne" des Sees verstehen wir jede Vertiefung des Erdbodens, in welcher sich stehendes Wasser ansammeln kann, ohne Rücksicht auf die Wirkung, die das Wasser auf die Wände des Behälters ausgeübt hat. Die Wanne ist also der Behälter des Sees in *statu nascendi*. Das Seebecken hingegen hat sämtliche später zu beschreibende Einwirkungen des Wassers erlitten, es ist die umgebildete Wanne. (Der Uebersetzer E. W.)

schichte ist aus dem geologischen Aufbau der Umgebung und den Eigentümlichkeiten des Seebeckens zu entziffern [1]).

Vor wenigen Jahren hat A. Penck[2]) eine ausführliche Darstellung und Klassifikation der Wannen und Wannengebiete der Erde gegeben; er unterscheidet zwischen trockenen und wassergefüllten Wannen, zwischen Endseen, d. h. Seen ohne Abfluß, und Flußseen, d. h. Seen mit Abfluß. Wir verweisen auf sein Werk und ziehen es vor, uns hier nur kurz mit der Entstehung der Wannen zu befassen; erst in einem späteren Kapitel werden wir auf die Bedeutung des Vorhandenseins oder Fehlens eines Abflusses hinzuweisen haben.

1. Tektonische Seen.

In jeder Region der Erde, die in Faltung begriffen ist, ist die Möglichkeit zu Wannenbildung vorhanden. Die Antiklinalen und Synklinalen, die durch den Zusammenstau der Erdrinde entstehen, sind nicht selten unregelmäßig, so daß sich in einer Synklinale eine Wanne einstellt, in der sich das Wasser zum See ansammeln kann (Seen von St. Point und Remorey bei Pontarlier nach Delebecque)[3]).

Theoretisch betrachtet kann auch der Aufbruch einer Antiklinale zur Bildung einer Wanne führen, die einen See beherbergt, wenn die Sohle des Risses undurchlässig genug ist, um das Wasser am Einsickern zu verhindern[4]).

Verwerfungen können die Wannenbildung im Faltenland erleichtern, wenn sie eine Synklinale queren und der thalaufwärts gelegene Flügel der Verwerfung der gesenkte ist; der thalabwärts gelegene wird dadurch zum Wehr, das den Flußlauf des Thales staut, und die neugebildete Wanne wird zum See. Ebenso kann eine lokale

---

1) Vergl. W. M. Davis, On the classification of lake bassins. Boston Soc. of Nat. History XXI. 315. 1882.

2) A. Penck, Morphologie der Erdoberfläche II. 203. Stuttgart 1894.

3) André Delebecque, Les lacs français. Paris 1898.

4) In neuerer Zeit erklärt man allerdings die Aufbrüche der Antiklinalen nicht durch Bersten, sondern durch Denudation.

Hebung im unteren oder eine entsprechende Senkung im oberen Teil eines Thales zur Seebildung Anlaß geben.

Außerhalb der Faltengebiete kann Wannen- und Seebildung auch auf Ebenen und Plateauflächen stattfinden, wenn lokale Hebungen oder Senkungen den Wasserabfluß hemmen.

So können tektonische Erscheinungen wie Faltungen, Verwerfungen und Verschiebungen allein für sich ohne Mithilfe anderer Faktoren zur Bildung von Seen führen. Doch sind Seen rein tektonischen Ursprunges verhältnismäßig selten.

2. Erosionsseen.

Sämtliche Erosions- und Denudationsvorgänge können zu Wannen- und damit zu Seebildung führen. Die hier in Betracht kommenden Formen der Erosion sind:

Erosion durch die Luft (aeolische Erosion oder Denudation). Der Wind entführt die Sand- und Staubmassen, die sich durch den Zerfall der Gesteine in trockenen Gegenden an der Landoberfläche bilden. Er trägt den Staub fort, der den Boden der Steppe bildet, um ihn an anderer Stelle abzusetzen. So entstehen hie und da weite, flache Wannen, in denen sich während der Regenzeit Wasser ansammeln kann (manche Wüstenseen, Schotts, Sebkas). Da die Winde unregelmäßig arbeiten, bald erodieren, bald akkumulieren, so kann es vorkommen, daß eine durch Wind ausgehöhlte Wanne später vom Wind wieder ausgefüllt wird. Die Wirkungen der aeolischen Erosion sind unbedeutend; ich erwähne sie nur der Vollständigkeit halber.

Erosion durch das Wasser. Hier haben wir zu unterscheiden:

a) Erosion durch stehendes Wasser; sie beruht allein auf der chemischen Wirkung des Wassers. Wenn eine Wassermasse sich auf einer löslichen Schicht in einer flachen Wanne sammelt (z. B. auf Gips), so löst sie das Gestein auf. Fließt das gesättigte Wasser ab und wird durch frisches ersetzt, so kann die Tiefe der Wanne vergrößert werden und es kommt zur Bildung

eines eigentlichen Seebeckens (Lac de la Girotte, nach Delebecque)[1]. Doch wird die Bildung einer die Wanne auskleidenden Schlammschicht bald der weiteren Vertiefung eine Grenze setzen.

b) Erosion durch fließendes Wasser; diese wirkt gleichzeitig chemisch auflösend und mechanisch abnutzend und fortführend. Die mechanische Erosion durch fließendes Wasser kann wohl zur Bildung von Thälern mit gleichsinnigem Gefälle, nicht aber zur Bildung von Wannen führen. Die durch Erosion aus dem Bett losgelösten Geschiebe können nur abwärts und nicht aufwärts transportiert werden; größere Gegengefälle können nicht überwunden werden. Die unter Mithilfe des flußabwärts wandernden Geschiebes im Flußbett ausgekolkten Vertiefungen, Riesentöpfe, Kessel etc., wie sie z. B. am Fuß von Wasserfällen auftreten, sind stets nur kleine vom Wasser erfüllte Wannen, welche den Namen See kaum verdienen. Die größte bekannte Wanne dieser Entstehung, am Fuß des Niagarafalles, würde in der That, wenn der Strom abgeleitet würde, einen wirklichen See von etwa 50 m Tiefe, aber nur einigen 100 m Breite bilden.

Die chemische Wirkung des fließenden Wassers ist besonders beim Einschneiden, Ausweiten und Vertiefen der unterirdischen Gänge und Becken thätig. Sie arbeitet hier fast allein und ihr hat man oft die Bildung bedeutender Höhlen zuzuschreiben. Unter gewissen Umständen kann sie sogar indirekt zur Bildung offener Seen Anlaß geben. Wenn nämlich die unterirdischen Gänge sich stark verbreitern, so tritt ein Moment ein, wo die Decke des Ganges dem Druck der darüber liegenden Schichten nachgibt und einstürzt. Das Nachstürzen setzt sich durch die hangenden Schichten bis zur Erdoberfläche fort, so daß eine offene Wanne entsteht, die zum See werden kann, wenn sich die Abflußkanäle verstopfen (Mansfelder Seen).

Gletschererosion. Kann ein Gletscher durch Erosion eine Wanne bilden? Diese Frage ist, seitdem sie

[1] a. a. O. S. 318.

um das Jahr 1860 durch Ramsay, Tyndall, Gabriel de Mortillet und Gastaldi aufgeworfen wurde, immer wieder diskutiert worden. Hervorragende Forscher wie James und Archibald Geikie und R. Wallace in England, F. v. Richthofen und vor allem A. Penck und seine Schüler in Deutschland und Oesterreich, sind für eine Wannenbildung durch Gletscher eingetreten [1]. Bestritten wird sie mit ebenso großer Entschiedenheit von sämtlichen schweizerischen Geologen und zahlreichen außerschweizerischen Forschern, wie Ball, Murchison, Pfaff, B. Studer, A. Favre, L. Rütimeyer, A. Heim. Die Frage verdient daher noch eine ernste Berücksichtigung. Eine vollständige kritische Darstellung der Diskussion würde uns jedoch an dieser Stelle zu weit führen. Wir beschränken uns darauf, die wichtigsten Einwände, die unserer Ansicht nach gegen die Theorie Ramsays gemacht werden können, in einigen Sätzen zusammenzufassen.

1. Der Gletscher erodiert als plastische, in Bewegung begriffene Masse den Boden und die Seitenwände des Thales, in welchem er fließt, vermittelst der Felstrümmer, welche er mitführt. Das steht durch zahllose Beobachtungen fest.

2. Eine Excavation übt aber der Gletscher an seiner Sohle nicht aus. Unter Excavation verstehe ich die Ausgrabung einer Hohlform mit Gegengefälle, einer Wanne, in der sich Wasser ansammeln kann. Eine Excavation setzt nämlich nicht nur voraus, daß die felsige Unterlage angegriffen und zu Geschieben, zu Sand und zu Schlamm mechanisch zerkleinert wird, sondern auch daß diese Trümmer fortgeführt werden. Fände eine Wegführung nicht statt, so müßte die aus diesen Trümmern entstehende Grundmoräne bald eine so dicke Schicht bilden, daß sie das Bett des Gletschers gegen weitere Erosion schützen würde. Damit immer wieder neue Gesteinsmassen der Gletschererosion zugänglich würden, müßte also der unter dem Gletscher fließende Bach die Grund-

[1] Vergl. den Litteraturnachweis bei A. Penck, Vergletscherung der deutschen Alpen. Leipzig 1882. 368 f.

moräne in dem Maße, wie sie sich bildet, wegführen. Dieser Transport durch fließendes Wasser kann aber nur in der Richtung des Gefälles, nicht gegen dasselbe, stattfinden. Bei der Entstehung eines Gegengefälles würde das Fließen des Wassers und damit der Transport von selbst aufhören; die im Gletscherbach suspendierten Materialien würden sich sofort in dem des Gegengefälles wegen stagnierenden Wasser niederschlagen und so die Wanne ausfüllen. Soweit also die Grundmoräne erst durch den Gletscherbach herausgeschafft werden muß, ist eine Entstehung von Wannen ausgeschlossen[1]).

Es fragt sich nun, ob nicht eine Excavation dadurch zu stande kommen kann, daß der Gletscher in den untersten Schichten eingeschlossene Blöcke und Steine transportiert. Meiner Meinung nach nicht. Alle meine Beobachtungen an Gletschern haben gezeigt, daß dieser Transport eigentlich gering ist. Ferner: wenn ich auch begreifen kann, wie die untere Schicht des Gletschers sich einen Block einverleiben kann, der sich auf einem vorspringenden Buckel des Gletscherbettes, wo dieses konvex ist, befindet, so kann ich doch nicht verstehen, wie ein Gletscher seine felsige Unterlage, nachdem er sie einmal geglättet und eine konkave Vertiefung eingeschliffen hat, angreifen und Stücke derselben fortschaffen soll.

3. Bei keinem einzigen der heutigen Gletscher, die sich doch weit zurückgezogen haben, hat man irgendwo freigewordene Wannen im festen Fels oder in der Grundmoräne beobachtet, selbst nicht am Fuße eines Gletschersturzes, wie ihn der Rhonegletscher aufweist. Das gleichsinnige Gefälle der Sohle des vergletscherten Thales wird nirgends durch ein Becken oder ein Gegengefäll unterbrochen.

4. Als Hauptargument für die Ramsaysche Hypothese wird die Existenz eines Gürtels subalpiner Seen (Randseen) am Rande derjenigen Hochgebirge betrachtet, die einst eine Zeit außerordentlichen Gletscherstandes, eine lokale Gletscherperiode erlebten, wie die Alpen, das skandi-

[1]) Vergl. die weitere Ausführung dieses Argumentes in F. A. Forel, Léman I. 139 f.

navische Gebirge, die neuseeländischen Alpen u. s. f. Dieses Argument verliert aber bedeutend an Wert, wenn die geographische Thatsache der Existenz von Randseen auch auf andere Weise erklärt werden kann. Die von Lyell[1]), Heim[2]) und mir[3]) formulierte Hypothese erklärt nun die Bildung der Randseen auf andere völlig befriedigende Weise. Dieselbe dürfte, in der Form, die ich ihr gegeben habe, in einigen Punkten verallgemeinert, so ziemlich auf alle Hochgebirge mit Randseen anwendbar sein.

In Gegenden, in denen die Erdrinde infolge der Kontraktion des Erdinnern durch einen gewaltigen horizontalen Druck zu parallelen Falten zusammengestaut wurde, lassen sich zwei Phasen der Gebirgsbildung unterscheiden, mit denen die lokale Gletscherperiode und die Bildung der Randseen eng verbunden sind.

Erste Phase: Faltung der Erdschichten, Emporhebung der Antiklinalen über die Schneegrenzen; infolgedessen Anwachsen der Gletscher, Gletscherperiode, Bildung von Thälern mit gleichsinnigem Gefälle durch Flüsse und Gletscher.

Zweite Phase: Das Erdinnere fährt fort sich zusammenzuziehen; ihm folgend senkt sich die früher durch Faltung gehobene Region als Ganzes, weil sie infolge der Faltung nicht mehr die Festigkeit eines intakten Gewölbes besitzt. Die Folgen dieser allgemeinen Senkung des Gebirges sind mannigfach: Allgemeine starke Abnahme der Gletscher und Ende der Gletscherperiode; durch Senkung des oberen Teils der Erosionsthäler Entstehung eines Gegengefälles an der Grenze der gesunkenen Region und dadurch Bildung der Wannen der Randseen.

Diese Hypothese, welche, soweit sie die schweizerischen subalpinen Seen betrifft, als plausibel angenommen wurde, kann unserer Meinung nach auch auf die anderen

---

1) Lyell, Ancienneté de l'homme, trad. M. Chaper. Paris 1864. p. 332.

2) A. Heim, Entstehung der alpinen Randseen. Vierteljahresschrift der Züricher Nat. Gesellsch. XXIX. Zürich 1894.

3) F. A. Forel, Société vaud. Sc. nat. 8. Janv. et 5. mars 1890. Le Léman I. 211 u. f.

Hochgebirge übertragen werden. Sie erklärt im Zusammenhang die eiszeitliche Entwickelung der Gletscher und die Entstehung von Randseen am Ende der Gletscherzeit. Wenn man sie ganz allgemein auf die Randseen aller Gebirge anwenden könnte, so wäre den Anhängern der Seebildung durch Gletscher ihr gewichtigstes Argument genommen.

Dieser Theorie könnte man das Dogma von der Gleichzeitigkeit der Gletscherzeit oder der Gletscherzeiten auf der Erde entgegenhalten. Allein die Gleichzeitigkeit dieses durch dieselben Bedingungen auf der ganzen nördlichen Hemisphäre veranlaßten Hervorbrechens der Gletscher aus den Alpenthälern in die subalpinen Ebenen halte ich noch nicht für erwiesen. Doch auch Forscher, die an der Hypothese der Gleichzeitigkeit der Vergletscherungen festhalten und daher unsere Anschauung über die Bildung der Randseen zurückweisen, brauchen deshalb noch nicht unter die Excavationisten zu gehen. Um das zahlreiche Auftreten der Seen in der subalpinen Region zu erklären, genügt es anzunehmen, daß die ursprünglich vorhandenen Wannen durch die Gletscher, die sie erfüllten, erhalten wurden. Der Gletscher würde in diesem Falle die Wanne erfüllt haben, während die fluvioglacialen Ablagerungen weiter unten sich absetzten; er wäre also als Konservater und nicht als Schöpfer der Wanne zu betrachten.

Fassen wir zusammen!

Die Erosion als solche spielt, solange sie allein thätig ist, bei der Wannenbildung nur eine untergeordnete Rolle. Die aeolische Erosion kann in Wüstengegenden einige flache Wannen gebildet haben. Die Wassererosion spült auf mechanischem Wege am Fuße von Wasserfällen Kessel und Riesentöpfe aus. Sie kann auch auf chemischem Wege Gesteine gelöst und so einige Wannen von geringer Größe erzeugt haben. Die Gletschererosion endlich mag vielleicht einige Tümpel in den alpinen Regionen ausgehöhlt haben. Sie kann aber nicht als allgemeines und einzig wirkendes mächtiges Werkzeug für die Bildung großer Seen angesprochen werden.

3. Dammseen.

Jedes Thal, mag es sein Dasein tektonischen Vorgängen oder der Erosion des fließenden Wassers oder der Gletscher verdanken, kann in eine Wanne und in einen See umgewandelt werden, wenn ein Damm sich bildet, der den Abfluß des Wassers hemmt. Der Damm, der das Thal sperrt, kann sein:

a) Ein Bergsturz (Klönthalersee, See von Derborence, Alleghesee, Oeschinensee nach Brückner, See Gohna im Himalajagebirge, 1894 gebildet),

b) Ein Lavastrom (Lac d'Aydat, Delebecque),

c) Ein Gletscher (Merjelensee beim Aletschgletscher),

d) Eine Ufermoräne, die ein Thal quert (Matt-Marksee).

e) Eine Endmoräne, die aber nur unter gewissen Bedingungen zu Seebildung führen kann. Gewöhnlich fließt nämlich das Schmelzwasser im Gletscherbach durch eine breite Bresche in der Moräne ab; der Moränenwall ist nicht geschlossen und kann daher das Thal nicht absperren. Für sich allein ist daher eine Endmoräne außer stande, einen See zu bilden. Es kann allerdings der Moränenwall intakt bleiben, doch nur wenn er auf einem Gegengefälle, z. B. auf einem zum Gletscher fallenden Gehänge abgesetzt wird, wie die Moräne des diluvialen Rhonegletschers auf den Abhängen des Jura. Das Schmelzwasser fließt alsdann rückwärts unter dem Gletscher ab. In diesem Falle kann sich vor der Moräne stehendes Wasser ansammeln und so einen See bilden. Allein dieser See liegt außerhalb des Territoriums des Gletschers und gehört seiner Natur nach zum Typus d, bei welchem der Damm von einer Ufermoräne gebildet wird.

f) Schneiden sich Endmoränen, die verschiedenen Gletscherhochständen entsprechen, unter spitzem Winkel, so können zwischen ihnen kleine Wannen ausgespart bleiben, in denen sich Wasser ansammelt. Solche Moränenseen sind häufig, aber immer von geringer Größe.

g) Der Schuttkegel eines aus einem Seitenthal in

das Hauptthal einmündenden Wildbaches kann einen Querriegel durch das Hauptthal bilden und so den Fluß stauen (Wäggithaler See, 1878 durch die Schottermassen des Schlierenbaches gebildet [Heim], Silser- und Silvaplanasee).

h) Zu den Dammseen gehören auch die mehr oder weniger kreisrunden von den Rändern vulkanischer Krater umschlossenen Kraterseen (Seen von Albano und Nemi). Doch können Kraterseen auch gemischten Ursprunges sein, indem der untere Teil der Wanne als Einsturz- oder Explosionskrater entgegentritt, während die oberen Teile aus den durch den Krater ausgeworfenen Materialien bestehen.

4. Seen gemischten Ursprungs.

Mit Ausnahme der Umwallungen der Kraterseen verlaufen die Dämme in geraden oder schwach gekrümmten Linien. Sie können daher für sich allein nur einen Teil der gesamten Wandungen der Wanne bilden. Die übrigen Wandungen werden durch präexistierende Gehänge gebildet. Folglich ist die Entstehung der meisten Dammseen an das Vorhandensein eines Thales geknüpft. Die Dammseen sind daher im allgemeinen selten einfachen Ursprunges; meistens haben zwei oder mehrere Faktoren an der Bildung der Wanne mitgewirkt: der Vorgang, der das Thal schuf und hierauf die Dammbildung.

Die seebildenden Faktoren können sich in sehr mannigfacher Weise kombinieren. Das muß in jedem einzelnen Falle untersucht und festgestellt werden; die Zahl der Kombinationen ist zu groß, als daß wir hier alle aufzählen und klassifizieren könnten. Eine der merkwürdigsten bildet wohl der folgende Fall: Ein offener Flußlauf tritt in einen Höhlengang ein. Die hier wie überall thätige Erosion schneidet in die Tiefe; es entsteht flußaufwärts der Stelle, wo das Wasser in den Höhlengang eintritt, ein offenes Thal, das nach unten blind endet. Wird durch irgend ein Ereignis der unterirdische Abflußkanal verstopft, so füllt sich das Thal mit Wasser und wird zum See. So entstanden im schwei-

zerischen Jura der See von Joux und der See von les Brenets.

Wenn auch jedes Seebecken seine eigene, aus der Entwicklungsgeschichte seiner Umgebung sich ergebende Entstehung hat, so läßt sich doch nicht leugnen, daß die Seen ein und derselben Region sehr oft eine ganz analoge und ähnliche Geschichte besitzen. Beispiele hierfür bieten die Seen Finnlands, Schwedens, Nordpreußens, des Jura, des französichen Centralplateaus, der subalpinen Region, sowie die großen Seen der Vereinigten Staaten Nordamerikas. Alle diese Seen bilden Gruppen oder vielmehr wahre Familien von Seen, deren einzelne Glieder sehr nahe Verwandtschaft aufweisen [1]. Die Feststellung der Entstehung eines Sees wird oft durch Berücksichtigung dieser Thatsache bedeutend erleichtert.

III. Das Becken des Sees.

Nehmen wir an, es sei durch irgend einen Vorgang eine Wanne gebildet worden. Ist nur der Boden der Wanne genügend undurchlässig und das Klima einigermaßen feucht, so daß die Wassermengen, die direkt in die Wanne fallen, zusammen mit der Wasserzufuhr durch die Zuflüsse größer sind als die Verdunstung, so füllt sich die Wanne und wird zum See. Die in der Wanne anwesende Wassermasse verändert nun fortschreitend das Relief der letzteren. Wellenschlag und Strömungen greifen die Ufer an. Auf den Böschungen und am Boden der Wanne setzen sich Alluvionen ab, die die Zuflüsse dem See zuführen, und verändern deren Form. Die ganze Wanne nimmt mehr und mehr die Natur eines Seebeckens an. Diese Modifikationen sind in Seen mit veränderlichem Wasserstande verwickelt und schwer zu entwirren. Nur in Seen mit relativ konstantem Wasserstande treten sie in voller Reinheit auf. An diesen wollen wir sie betrachten.

[1] Vgl. Penck, Morphologie der Erdoberfläche II. S. 233.

IV. Hydrographische Karten.

Das Relief eines Seebeckens wird durch hydrographische Karten veranschaulicht, die auf Grund eines genügend dichten Netzes von Lotungen konstruiert wurden. Wir können hier auf die Methoden nicht eingehen, nach denen der Ingenieur und der Hydrograph Tiefenmessungen vornimmt, die genaue Lage der geloteten Punkte bestimmt und sie in die Karte einträgt, so wichtig auch seine Arbeit ist; denn von der Genauigkeit derselben und von der Dichte der Lotungen hängt der Wert der Karte ab. Aber auch wenn sämtliche Vorsichtsmaßregeln beobachtet und eine genügend große Zahl von Punkten[1]) genau gelotet, ihrer Lage nach bestimmt und in die Karte eingezeichnet sind, so wird doch noch der wissenschaftliche Wert der Karte von einem weiteren Moment abhängen, dem geographischen Takt, mit dem der Hydrograph seine Lotungspunkte wählt und Tiefenlinien zieht. Sobald der Grund des Sees nicht mehr sichtbar ist, was schon bei Tiefen von wenigen Metern eintritt, müssen die Unebenheiten des Seegrundes, die Einzelheiten seines Reliefs erraten werden. Der lotende Ingenieur ist ein Blinder, der die Topographie des Bodens, den er graphisch darstellen und beschreiben soll, nicht überblicken kann. Diesem Uebelstande muß er durch eine genaue Kenntnis der Gesetze der Topographie der Seen abhelfen. Er muß wissen, wo er am Seegrund einen ungestörten regelmäßigen Verlauf des Geländes und wo er Unregelmäßigkeiten zu gewärtigen hat. Im ersteren Falle darf er die Lotungen weit auseinanderrücken, im anderen wird er die Lotungen häufen. Aus der Aenderung der Tiefe von einem Lotungspunkt zum anderen muß er gleichsam spüren, ob er sich einem unterseeischen Hügel oder einer Vertiefung nähert. Ist er in die Nähe eines solchen Punktes gelangt, so muß er so lange loten, bis

---

1) Die Zahl der geloteten Punkte ist 21 per Quadratkilometer für die Karte des Genfer Sees, 20 für diejenige des Bodensees, noch größer für kleinere Seen.

er den höchsten, bezw. den tiefsten Punkt gefunden hat. Im allgemeinen kann man von den Regionen des Seebeckens, wo reichlicher Absatz von Alluvionen stattfindet, ein einförmiges Relief erwarten. Wo dagegen die Alluvionen die ursprünglichen Einzelheiten des Geländes noch nicht verdeckt haben, zeigen sich Unregelmäßigkeiten ebenso häufig wie unerwartet. Da kommt es zu manchen Ueberraschungen. Wer hätte die durch Hörnlimann[1]) entdeckten unterseeischen Rinnsale des Rheins im Bodensee und der Rhone im Genfer See vermutet? Wer hätte die Existenz des Boubioz, dieser eigentümlichen lochartigen Vertiefung im See von Annecy, ahnen können? [2])

Das Relief des Seebeckens wird durch Isobathen, d. h. durch Kurven gleicher Tiefe, vom mittleren Wasserstand abwärts gerechnet, dargestellt. Sind die hydrographischen Karten ein integrierender Bestandteil der Landkarten eines Gebietes, so bedient man sich lieber der Isohypsen oder der Kurven gleicher Höhe, genau so wie auf dem trockenen Land.

Eine für wissenschaftliche Zwecke bestimmte Karte sollte sämtliche gelotete Punkte enthalten. Doch ist es unnötig, den numerischen Wert der Lotung jedem Punkt beizuschreiben, da dieser Wert aus dem Verlauf der nach den Messungen konstruierten nächsten Isobathen leicht geschätzt werden kann. Karten, die mit Tiefenquoten überladen sind, wie das meist bei marinen Karten der Fall ist, sind schwer zu lesen, auch wenn die Isobathen eingetragen sind. Die Einzelheiten des Reliefs treten für das Auge nicht hervor und werden leicht übersehen. Unbedingt nötig ist jedoch die Kenntnis der Dichte des Netzes der geloteten Punkte, ja sogar des genaueren Ortes jeder einzelnen Lotung. Nur so wird man sich ein Urteil über die Zuverlässigkeit des Verlaufes der Isobathen und über die größere oder geringere Wahrscheinlichkeit des Uebersehens einer Unebenheit seitens

[1]) Blatt 78 und 466 des schweiz. Siegfried-Atlas 1:25000.

[2]) H. B. de Saussure, Voyages dans les Alpes. III. 4. Neuchâtel 1796. Delebecque, Lacs français p. 31.

des aufnehmenden Hydrographen bilden können. Tiefenzahlen müssen nur an extreme Punkte, so auf Gipfel von unterseeischen Erhebungen und an tiefste Stellen von Einsenkungen, ferner auf Sättel gesetzt werden.

Eine gute hydrographische Karte erfordert äquidistante Horizontalkurven. Wird aus irgend einem Grunde die Zahl der Kurven an einer bestimmten Stelle durch Einfügen von Zwischenkurven vergrößert, so muß doch streng darauf geachtet werden, daß die Zeichnung der eingeschalteten Kurven so fein sei, daß man sie leicht von derjenigen der normalen äquidistanten Kurven unterscheiden kann.

V. Umbildung der Wanne zum Seebecken.

Eine Wanne füllte sich mit Wasser und ward zum See; aus der Wanne wurde hierauf allmählich ein Seebecken. Welche Veränderungen haben dabei stattgefunden?

Welche Eigenschaften charakterisieren überhaupt ein Seebecken gegenüber der Wanne, aus der es entstand?

Um das festzustellen, müssen wir untersuchen:

1. die Struktur des Seebeckens als des Behälters einer stehenden Wassermasse; wir werden dadurch die Veränderungen kennen lernen, die der Behälter durch die Wassermasse des Sees erleidet;

2. die Struktur des Seebeckens als des Sammlers der Zuflüsse; wir werden daraus den umgestaltenden Einfluß der Zuflüsse ersehen.

Die typischen Umgestaltungen, die sich bei der Umbildung einer Wanne in ein Seebecken vollziehen, können sehr gut an Seen mit konstantem Wasserstande beobachtet werden, noch besser aber an solchen, die nach langem Stillstande plötzlich gesunken sind. An ihnen lassen sich besonders gut die komplizierten Erscheinungen der Uferlinien studieren (Lake Bonneville und Lake Lahontan in Nordamerika).

VI. Die Regionen des Sees.

Um uns über diese Umbildungen Rechenschaft zu geben, müssen wir die einzelnen Teile und Regionen kennen lernen, die man an einem Seebecken unterscheiden kann.

Wir unterscheiden in jedem See:

1. die Sohle des Seebeckens (franz. *plafond*); sie ist mehr oder weniger horizontal, häufig außerordentlich eben, zuweilen aber auch unregelmäßig mit Erhöhungen und Vertiefungen ausgestattet;

2. die Gehänge des Seebeckens *(talus du lac.)*; es sind das die mehr oder weniger geneigten Wandungen, die sich zur Sohle des Sees senken und diese allseitig einschließen. Sie reichen von der Sohle bis zur Wasseroberfläche.

Nimmt das Seebecken den Boden eines Thales ein, so daß es länger als breit ist, so unterscheidet man:

die Sohle;

die Seitengehänge *(talus latéraux)*;

die Endgehänge *(talus terminaux)* und zwar das absteigende Endgehänge oder Hintergehänge *(rampe descendante, talus amont)* am oberen und das ansteigende Gehänge oder Vordergehänge am unteren Ende des Sees *(rampe ascendante, talus aval)*.

Die Teile des Seebeckens gehören zwei in mannigfachen Beziehungen verschiedenen Regionen an.

1. Die Tiefenregion umfaßt denjenigen Teil des Sees, der durch seine Tiefe den umgestaltenden Kräften der littoralen Region entzogen ist. Dieser Region gehören die Sohle und der untere Teil der Gehänge des Seebeckens an.

2. Die Küstenregion. Die Region, die die Verbindung zwischen dem Land und den Tiefen des Sees herstellt, ist sehr komplexer Natur. Zum Lande gehört sie durch ihren über dem Wasserspiegel gelegenen, zum See durch ihren untergetauchten Teil. Die Grenze dieser

beiden nebeneinander gelegenen Zonen verschiebt sich infolge der Veränderlichkeit des Wasserstandes fortwährend auf und ab; beide Zonen stehen daher in beständiger geophysischer, physikalischer und biologischer Wechselwirkung. Aus diesem Grunde halte ich es für angezeigt, für die ganze Region einen zusammenfassenden Namen zu wählen: ich nenne sie Küstenregion *(côte)*. Sie ist die Uebergangszone vom Wasser zum Festlande.

Die Küstenregion gliedert sich folgendermaßen:

I. Das Ufer (franz. *rivage*) ist der außerhalb des Sees über dem Wasserspiegel gelegene Landgürtel, der den See allseitig einfaßt. Das Ufer wird von der Brandung überspült und gewaschen, so daß alle erdigen Bestandteile weggeführt werden; es besteht daher aus Fels und Sand. Es läßt sich auch als der durch das Wasser des Sees bespülte und modifizierte Teil des Festlandes bezeichnen.

II. Die littorale Zone des Sees oder das Littoral ist der entsprechende Grenzgürtel des Wassergebietes. Sie umgibt den ganzen See und reicht bis zur unteren Grenze der direkten und indirekten Einwirkung des Wellenschlages, d. h. bis zu einigen Metern Tiefe.

III. Der Strand (franz. *grève*). Zwischen den beiden genannten Zonen und zugleich auf beide übergreifend, schaltet sich ein Zwischenglied ein, die Zone, wo sich die Wellen brechen, der Strand. Er besteht, da er durch die Brandung fortwährend gewaschen wird, ausschließlich aus gröberem oder feinerem Geröll und bildet eine schwach geneigte Böschung von wechselnder Breite.

Drei Unterzonen lassen sich hier unterscheiden:

a) Der trockene Strand *(grève exondée)* liegt bei ruhigem See trocken da; er wird nur durch die Ausläufer der großen Wellen benetzt.

b) Der untergetauchte Strand *(grève inondée)* liegt bei schwachem Wellenschlag unter dem Seespiegel, bei starkem Wellenschlag aber erscheint sein Boden im Wellenthal.

Da der Wasserstand aller Seen veränderlich ist, so existiert zwischen diesen beiden Zonen als Uebergangsglied

c) der überschwemmbare Strand *(grève innondable)*, der bei niederem Wasserstand dem trockenen, bei hohem dem untergetauchten Strand angehört[1]).

Der Strand ist gegen den See hin schwach geneigt. Seine Neigung und Breite wechselt von See zu See und von einem Punkt der Küste zum anderen. Es hängen diese Verhältnisse von folgenden Faktoren ab:

von dem gröberen oder feineren Korn des Materials, das den Strand aufbaut. Ein sandiger Strand ist stets weniger geneigt als ein aus grobem Geröll und Kies aufgebauter;

von der Größe der auflaufenden Wellen. Je größer die Wellen, desto weniger geneigt, und desto breiter ist der Strand;

von der allgemeinen Gestaltung der Küstenverhältnisse. Je steiler die Wandungen der Wanne, desto schmäler ist unter sonst gleichen Umständen der Strand.

VII. Umbildung der Wanne durch die Einwirkung des Sees.

Der See erodiert die Ufer der Wanne und zerstreut die dabei entstehenden Erosionsprodukte in der littoralen Zone. Seine Erosionsarbeit besteht im Angreifen, Untergraben und Zertrümmern. Unterscheiden läßt sich chemische und mechanische Erosion.

Das Seewasser wirkt lösend auf die Gesteine in seinem Bereich. Abgesehen von einigen leicht löslichen Gesteinen wie z. B. Gips und Steinsalz, wirkt diese chemische Erosion nur schwach und langsam. Die gelösten Materialien werden dem Seewasser einverleibt und vergrössern dessen Salzgehalt. Wir werden später von ihnen zu sprechen haben.

Die mechanische Erosion beruht in der Hauptsache

[1]) Unser überschwemmbarer Strand ist das genaue Analogon des intercotidalen ozeanischen Strandes, der bei Niederwasser trocken liegt, bei Hochwasser aber überschwemmt ist.

auf der Stoßkraft der Wellen. Die vom offenen See kommenden Wellen prallen gegen das Ufer an, erschüttern, lockern und zertrümmern dasselbe. Die Trümmer, die sich dabei bilden, werden weiter zerkleinert, bis sie so klein sind, daß die Wellen sie mit sich reißen und hin und her rollen. Durch diese Bewegung nutzen sie sich noch weiter ab und werden zu Geröllen. Die Gerölle ihrerseits werden durch die Wellen ihrer Größe nach in Bänken oder Zonen abgelagert; jede Bank besteht aus Geröllen von ungefähr gleicher Größe.

Weiterhin erleiden die verschiedenen Gerölle verschiedene Schicksale. Die einen werden von den zurückflutenden Wellen in die Tiefe des Sees geschafft, wo die Wellen sie nicht mehr zu erreichen und emporzuheben vermögen. Sie bilden hier die groben Alluvionen des Sees. Andere werden durch die Wellen fortwährend hin und her geschleudert, scheuern sich dabei ab, werden immer kleiner und kleiner und endlich zu feinem und feinstem Sand zerrieben. Als feiner Schlamm im Wasser suspendiert, werden sie schließlich fortgeführt und bilden die feinen Schlamm-Alluvionen des Sees. Diese Arbeit der Wellen wird durch verschiedene Nebenwirkungen noch unterstützt:

Der im Wasser der Wellen suspendierte Sand nutzt nach Art eines Sandgebläses die Gesteine der Küste ab.

Die Verwitterung der spaltbaren Gesteine wird durch das Alternieren von Befeuchtung — durch Brandung und durch Regenschauer — und Austrocknen begünstigt. Ebenso wirkt das wechselnde Gefrieren und Auftauen.

Alle diese Vorgänge zusammen untergraben die Küste und führen zur Bildung eines Kliffs *(falaise)*, das langsam vom See landeinwärts zurückweicht. An seinem Fuß wird es durch die Brandung fortwährend unterwaschen; die oberen Teile verlieren ihren Halt, stürzen infolgedessen ab und bilden am Fuße eine Schutthalde, die durch die Brandung wieder weggeschafft werden kann. All dieses Trümmerwerk am Strand ist völlig ausgewaschen und frei von erdigen Bestandteilen. Die einzelnen Trümmer werden schließlich nach ihrer Größe

geordnet abgesetzt und bilden hier Zonen von Geröllen, von Kies und Sand.

Wenn das Gestein der Küste nicht homogen ist, z. B. aus Gletschermoränen besteht, so können auf dem Strande große isolierte Blöcke zurückbleiben, die weniger angegriffen werden, als die Masse, in der sie eingebettet waren; sie widerstehen länger der Zertrümmerung.

Sind die Materialien fein genug zerrieben, so werden sie durch die an die Küste prallenden Wellen aufgewirbelt und als suspendierter Sand fortgeführt. Bei Sturm erscheint das littorale Wasser des Sees durch diesen aufgewirbelten Sand ganz getrübt. Der zurückkehrende Unterstrom der Wellen (Sog) zieht dieses trübe Wasser in den See hinaus. Sobald es hier aus dem Bereich des Wellenschlages gekommen ist, läßt es die schwereren suspendierten Substanzen fallen. Der Sand schlägt sich zu Boden: es bilden sich Alluvionen.

Diese Alluvionen werden an der unteren Grenze der Wirkung der Wellen abgesetzt und bilden hier unter dem Wasser eine beinahe horizontale, aus Schuttmassen, die zum See hinfallen, aufgebaute Terrasse, die wir mit Ed. Richter[1]) Uferbank (franz. *beine*[2]) nennen. Die seewärts gerichtete Böschung dieser Uferbank nennen wir die Seehalde (franz. *mont*). Diese unterseeische littorale Terrasse oder Uferbank ist für die littorale Region sämtlicher stehender Gewässer charakteristisch.

Die Uferbank setzt sich aus zwei Zonen zusammen, die beide im Laufe der Zeit an Breite zunehmen. Der äußere, dem Ufer näher gelegene Teil, die erodierte Uferbank *(beine d'érosion)* entsteht durch die erodierende Wirkung der Brandung; sie ist in das Gestein der Küste eingenagt. Der innere, seewärts gelegene Teil, die angeschwemmte Uferbank *(beine d'alluvion)* ist aus den vom Ufer weggerissenen und seewärts an der Grenze der Einwirkung des Wellenschlages abgesetzten Trümmern gebildet.

---

1) Richter, Seestudien. Wien 1897. S. 28.

2) Am Genfer See bezeichnet man die Uferbank mit dem Namen *beine*. Am Bodensee lautet der entsprechende Ausdruck nach Graf Zeppelin (Bodenseeforschungen I. III. Abschn. Lindau 1893) *Wysse*.

Die folgende Fig. 1 gibt einen typischen Querschnitt einer Küste.

Außer den relativ groben Materialien, die nur wenig weit vom Orte ihrer Entstehung entfernt die Uferbank aufbauen, entführen die Wellen dem Ufer noch große Mengen feinen Schlammes. Dieser stammt zum Teil aus den erdigen, thonigen Bestandteilen des Landes; zum Teil entsteht er durch die Abnutzung des groben, von

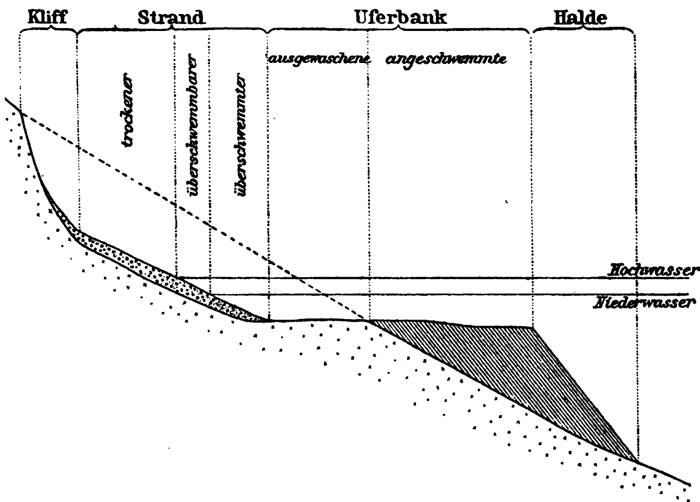


Fig. 1. Schema einer Erosionsküste (stark überhöht).

der Brandung hin und her geworfenen Gerölls. Dieser Schlamm hält sich lange schwebend im Wasser und wird weit fortgetragen; er setzt sich zusammen mit ähnlichen Schlammmassen anderen Ursprungs im See ab, wie wir später ausführlich darzustellen haben werden.

Seen ohne Zuflüsse, wie z. B. Kraterseen, beschränken ihre Wirkung am Ufer auf die Bildung eines Kliffs und einer Uferbank. Die große Mehrzahl der Seen besitzt jedoch Zuflüsse, deren Einfluß auf die Umgestaltung der Wanne wir nunmehr zu untersuchen haben.

VIII. Umbildungen der Wanne durch die Zuflüsse.

Die Zuflüsse, die ein See empfängt, sind entweder unterseeisch oder offen.

Betrachten wir zunächst den Einfluß der unterseeischen Zuflüsse; ein unterirdischer Fluß oder eine Quelle tritt an einem oder mehreren Punkten unter dem Wasserspiegel des Sees auf Klüften des Seebodens aus.

Unterirdische Wasserläufe pflegen klar zu sein und keine suspendierten Materialien zu führen[1]); sie setzen daher auch keine Alluvionen ab. Wir kennen kein Beispiel eines schlammbeladenen Flusses, der sich unterseeisch in einen See ergießt. Die Wirkungen, wie sie ein solcher Fluß ausüben würde, können deßhalb unerörtert bleiben.

Wenn eine klare Quelle irgendwo im Seebecken entspringt, so verhindert das heraussprudelnde Wasser durch seine Strömung lokal die Ablagerung der Seealluvionen, die sich sonst überall niederschlagen. Das Mundloch der Quelle bleibt frei von Alluvionen, während rings herum sich Schlamm absetzt. Die Quelle entspringt schließlich am Grunde eines Trichters, dessen Wandungen die Neigung von Schutthalden haben.

Das schönste Beispiel dieser Art bietet der Trichter „Boubioz“ im Lac d'Annecy, dessen wahre Natur A. Delebecque durch thermometrische Lotungen festgestellt hat. Dieser in die Uferbank eingesenkte Trichter hat eine Tiefe von 80 m, während die Maximaltiefe des Sees sonst nur 60 m beträgt.

Die offenen Zuflüsse, die in Form von Strömen, Flüssen, Wildbächen oder Bächen dem See Wasser zuführen, sind entweder immer klar oder führen Alluvionen. Im ersten Falle handelt es sich um Zuflüsse, in denen keine Hochwasser vorkommen, die ihre Transportkraft vergrößern und sie mit suspendierten Alluvionen

---

[1]) Es hängt das damit zusammen, daß die Abspülung durch Regenwasser, das den oberirdischen Flüssen die Hauptmasse des Schlammes zuführt, fortfällt.

beladen; sie haben auf die Umgestaltung der Wanne keinen weiteren Einfluß. Anders die Zuflüsse, die ständig oder zeitweise Gesteinsmaterial führen; es geschieht das in zweierlei Form, als grobe Alluvion und als Schlamm. Grobe Alluvionen, wie Sand, Kies, Geröll etc. können infolge ihres Gewichtes nur bei Hochwasser durch die gesteigerte Kraft der Strömung fortgeschafft werden. Sobald die Strömung abnimmt, werden sie abgesetzt.

Mündet ein Fluß in einen See, so verliert sich seine Strömung rasch in den ruhenden Wassermassen des Sees. Die groben Alluvionen fallen zu Boden und bilden einen Schuttkegel, das Delta, dessen Böschung von der Natur der Geschiebe abhängt. Ein Delta baut sich stets aus Schichten auf, die gegen den See hin fallen. Jedes Hochwasser setzt eine neue, seewärts geneigte Schicht ab. Die Geschiebe werden dabei ihrer Größe nach geordnet, derart, daß die größten sich dicht an der Mündung des Flusses ablagern. Führt ein Fluß reichlich grobe Geschiebe, so häufen sich dieselben unmittelbar an der Mündung an und bilden Barren, die über den Wasserspiegel emporwachsen.

Der Schuttkegel taucht allmählich über den Wasserspiegel auf und wird zum oberseeischen Delta, das seewärts vorrückt. Während am Rande das Delta unterseeisch durch Ansatz von weiteren schräggeneigten Schichten wächst, setzt der Fluß, der die über Wasser geratenen Teile des Deltas überfließt, auf diesem ungefähr horizontale Flußablagerungen ab. In einem geologischen Querschnitt durch ein Delta markiert daher diejenige Höhe, in der die horizontalen zu Tage abgelagerten Flußsedimente in die schräggeneigten Seealluvionen des Deltas übergehen, die mittlere Höhe des Wasserstandes bei der Bildung des Deltas.

Wenn der Geschiebetransport sehr lebhaft ist, so geschieht das Vorrücken des Deltas durch Absatz von Geschieben auf dem unter Wasser befindlichen Gehänge des Kegels — auf der Halde desselben — sehr rasch. Die Böschung, die die Halde dabei annimmt, entspricht derjenigen eines unterseeischen Schuttkegels und

ist um so größer, je gröber und eckiger die Geschiebe sind. Feiner Kies und Sand wird weiter hinaus geführt und in um so größerer Entfernung abgelagert, je feiner das Korn ist. Er bildet unterseeische Böschungen von geringerer Neigung. Große Flüsse, die in ihrem Unterlauf keine Wildwasser aufnehmen, führen nur feinen Sand. Sie bauen ein nur langsam wachsendes, oberseeisches Delta auf, dessen seewärts schauende unter Wasser befindliche Hänge nur sanft geneigt sind und weit in den See hinausreichen.

Der Schlamm, der die Flüsse so charakteristisch trübt und grau färbt, erhält sich in ruhigem süßem Wasser äußerst lange schwebend [1]). Er setzt sich nur ganz allmählich zu Boden und kann durch die Strömungen des Sees sehr weit verschleppt werden. Dabei ist der Weg, den der Schlamm zuerst im See zurücklegt, ein ganz bestimmter. Sobald Schlamm in beträchtlicher Menge im Flußwasser suspendiert vorhanden ist, beschwert er das Wasser merklich und bewirkt, daß es spezifisch schwerer ist, als dasjenige des Sees. Meistens genügt ein Schlammgehalt von nur wenigen Centigramm per Liter, um das Wasser des trüben Zuflusses dichter sein zu lassen, als das dichteste im See vorkommende Wasser [2]), d. h. als das Wasser der großen Tiefen, das kalt und daher dichter ist als das Wasser der geringeren Tiefen. Das Wasser des Zuflusses fließt in diesem Fall der Böschung des untergetauchten Schuttkegels entlang in die Tiefe und bis auf die Sohle des Sees. Zuweilen bildet sich geradezu ein Rinnsal aus, indem sich links und rechts der Strömung, dort, wo das fließende Wasser dieses unterseeischen Flusses mit dem ruhenden Seewasser in Berührung kommt, Schlamm- und Sandmassen ablagern; es bilden sich zwei parallele Dämme, wie bei der Rhone im Genfer See und beim Rhein im Bodensee. Aber auch wo ein Rinnsal fehlt, erreicht das trübe dichte Wasser des Zuflusses die größten Tiefen des Sees und

[1]) Nur in salzigem Wasser setzt er sich verhältnismäßig rasch ab. Vergl. H. Brewer in Amer. Journ. of Sc. XXIX. (1885) 1; ferner C. Barus, Ebenda 1889. 122 u. Bull. U. St. Geol. Survey Nr. 36. Washington 1886.

[2]) Selbstverständlich nur des Süßwassersees.

gelangt erst hier zur Ruhe; hier lagern sich allmählich die in ihm schwebenden Schlammmassen ab und wandeln so durch Auffüllung und Einebenung die Sohle des Sees in eine horizontale Fläche um.

Doch nicht die ganze vom Fluß in den See gebrachte Schlammmasse teilt dieses Geschick. Ein Teil bleibt schwebend in den Wassermassen der Oberfläche, wird von Strömungen verfrachtet und mischt sich mit den feinen Seeanschwemmungen, von denen im vorigen Kapitel die Rede war. Dies findet statt:

a) wenn sich der Zufluß in einen Salzsee ergießt, dessen Wasser dichter ist, als das durch seinen Schlammgehalt relativ dichte Flußwasser;

b) wenn das Wasser des Zuflusses nur mit geringen Mengen Schlamm beladen und sehr viel wärmer ist, als das Wasser der tiefen Schichten des Sees. Das leichtere Flußwasser breitet sich in diesem Falle an der Oberfläche oder in den mittleren Schichten des Sees aus, wie das stets bei den ins Meer mündenden Flüssen der Fall ist;

c) wenn der See stürmisch bewegt ist und an der Mündung des Zuflusses starker Wellenschlag herrscht. Ein Teil des Flußwassers kann sich auf diese Weise mechanisch mit dem Seewasser mischen. Das so durch Beimengung von Flußwasser verunreinigte Seewasser kann dann durch Strömungen weiter geführt werden; der in ihm enthaltene Flußschlamm wird, mit den feinen Seealluvionen gemischt, später an irgend einer Stelle des Sees abgelagert.

Aus dem Obigen ergibt sich, daß wir ganz allgemein vier verschiedene Arten von Alluvionen unterscheiden müssen, deren jede auf ihre eigene Weise entsteht und ihr bestimmtes Verbreitungsgebiet besitzt.

a) Die groben Seealluvionen bilden die angeschwemmte Uferbank (Fig. 2c).

b) Die groben Flußalluvionen, die von den Zuflüssen in den See gebracht werden, bilden den ober- und unterseeischen Schuttkegel des Deltas (d).

c) Die feinen Flußalluvionen gelangen in die großen

Tiefen des Sees und gleichen durch Kolmation die Unebenheiten der Sohle aus (b).

d) Der feine Seeschlamm, der hie und da mit Flußschlamm gemischt ist, wird durch Strömungen an der

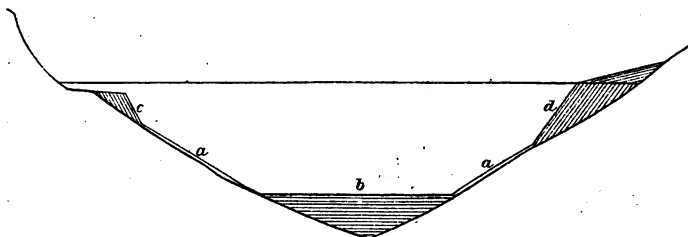


Fig. 2. Die vier Typen der Ablagerungen in einem See.

Seeoberfläche verteilt und schlägt sich, mit anderen Alluvionen gemischt, überall im Seebecken nieder (a).

IX. Die Ablagerungen im See nach den Formen, die sie aufbauen, und nach ihrer Zusammensetzung.

Wir haben gesehen, in welcher Weise im See eine Sedimentation erfolgt. Wir wollen nunmehr die Sedimente ohne Rücksicht auf ihre Entstehung ins Auge fassen und zugleich die Formen betrachten, die sie bilden.

Ausgenommen den feinen Seeschlamm, der sich gleichmäßig im ganzen See absetzt, bauen die See- und die Flußalluvionen in der That verschiedene, ganz bestimmte Formen auf, die sich im Relief des Seebeckens deutlich erkennen lassen. Es sind dieses:

a) Die Schutthalden des Seebeckens (franz. *talus d'éboulement*). An der Mündung der Zuflüsse bestehen sie aus groben Flußalluvionen, längs der untergetauchten Uferbank aus groben Seealluvionen. Je gröber und schwerer die Geschiebe sind, aus denen sich diese Schutthalden aufbauen, desto steiler ist ihre Böschung; sie kann nach Thoulet[1]) bis zu 41° oder 87 % steigen.

---

[1]) J. Thoulet, Etudes expérimentales sur l'inclinaison des talus de matières meubles. Nancy 1887.

b) Die Schwemmhalden *(talus d'alluvion)* bauen sich an Mündungen der Flüsse und Bäche aus den durch die Zuflüsse verfrachteten Sandmassen auf. Je wasserreicher der Fluß, je stärker seine Strömung, je feiner und leichter die Sandkörner, desto weiter werden diese in den See hinausgeführt. Folglich ist der Absatz an der Mündung am stärksten und nimmt mit zunehmender Entfernung von dieser ab. So entsteht eine sanft geneigte Halde, deren Böschung mit zunehmender Entfernung vom Ufer abnimmt und schließlich in der centralen Ebene des Sees gleich Null wird.

c) Die centrale Ebene des Sees *(plafond)* ist aus den feinen, im trüben Wasser schwebenden Schlammmassen gebildet, die sich auf der Sohle des Sees absetzen. Diese Ebene ist überall horizontal und zeigt nirgends Unebenheiten. Solange der Schlammabsatz fortdauert, nimmt sie an Fläche zu und kann so unter Umständen bedeutende Dimensionen erreichen. So beträgt z. B. die Fläche der centralen Ebene des Genfer Sees nicht weniger als 60 km^2.

Für die petrographische Zusammensetzung der das Delta aufbauenden Flußablagerung, sowie des auf der Sohle des Seebeckens sich niederschlagenden Flußschlammes ist die petrographische Beschaffenheit des Einzuggebietes des Sees maßgebend. Ebenso bestimmt der Charakter der Gesteine, die das Ufer zusammensetzen, die petrographische Natur der Schichten der Uferbank. Der feine Seeschlamm, der, mit den anderen Schlammabsätzen gemischt, gleichmäßig im ganzen Seebecken zur Ablagerung kommt, ist in petrographischer Hinsicht das Resultat der Mischung von Schlammteilen fluviatilen und lacustren Ursprungs. Die groben Alluvionen bilden Sand- und Kiesbänke, die mehr oder weniger mit feingeschlämmtem Thon durchsetzt sind. Die Schlammablagerungen bestehen aus Thon, Mergel, kohlensaurem Kalk oder Seekreide, je nachdem kieselige oder kalkige Elemente vorherrschen.

Chemische Niederschläge, die durch die physikalischen Eigenschaften des Wassers oder durch

biologische Einwirkungen bedingt werden, nehmen an der Bildung der Alluvionen bald in größerem, bald in geringerem Umfang teil; sehr beträchtlich sind sie z. B. bei Endseen, die im Zustand des Austrocknens sind [1]).

In mineralogischer Beziehung sind die Schlammablagerungen von See zu See je nach der Beschaffenheit des Einzugsgebietes verschieden. Sie bestehen entweder aus Thon, aus Mergel oder aus Kreide. Die Bildung von Konkretionen habe ich bis jetzt in solchen modernen Alluvionen nicht beobachtet.

X. Morphometrie.

Morphometrie nennt man jenen Zweig der geographischen Wissenschaft, der die Gestalt eines geographischen Objektes durch Zahlen auszudrücken strebt. Für einen See dürften die wichtigsten, morphometrischen Daten, deren Vergleich von See zu See interessante Resultate ergibt, die folgenden sein:

1. Der Flächeninhalt des Sees, d. h. die Größe des Wasserspiegels oder der von der Isobathe Null umschriebenen Fläche, vermindert um den Flächeninhalt allfälliger Inseln. Diese Flächenangabe sollte sich stets auf den mittleren Wasserstand beziehen. Man kann ferner den Flächenzuwachs messen, den die Seefläche bei Hochwasser erfährt; derselbe ist gleich dem Areal des durch das Hochwasser überschwemmten Gebietes. Dagegen glaube ich nicht, daß sich aus dem Verhältnis des Flächeninhaltes eines Sees bei hohem, mittlerem und niederem Wasserstande brauchbare Schlußfolgerungen ziehen lassen; denn die beiden Faktoren, die diese Verhältniszahlen bedingen, sind zu verschiedener Art: Das Ausmaß der Wasserstandsschwankungen einerseits und die Böschung des überschwemmbaren Strandes andererseits; letztere besteht dazu noch aus zwei sehr un-

[1]) Vergl. J. Russel, Lake Lahontan. U. S. Geological, Survey, Monograph Nr. XI. Washington 1885.

gleichen Teilen, je nach dem Verhältnis des ausgewaschenen und des angeschwemmten Strandes.

2. Die Länge des Sees. Sie kann verschieden definiert werden:

a) Die Länge der Luftlinie, die die beiden entferntesten Punkte des Sees miteinander verbindet.

b) Die wahre, entlang der Achse des Sees gemessene und sämtliche Krümmungen dieser Achse berücksichtigende Länge.

Die Länge zu messen, hat nur an relativ einfachen Seebecken einen Sinn; an kompliziert gebauten ist dies nicht wohl durchführbar. Wie soll man die Länge des zweiarmigen Lario (Comersees) schätzen oder diejenige des Vierwaldstättersees, dessen transversale Arme an seinem unteren Ende mit der Hauptachse ein Kreuz bilden?

3. Die Breite und zwar:

a) Die maximale Breite zwischen den am weitesten auseinanderliegenden Uferpunkten, senkrecht zur Hauptachse gemessen, und

b) die mittlere Breite; diese erhält man, wenn man den Flächeninhalt des Sees durch die Länge seiner Achse dividiert.

Ebensowenig wie die Länge kann bei kompliziert gebauten Seen die Breite angegeben werden. So halte ich es z. B. für unmöglich, die Breite des Näsijärvi in Finnland oder des Vierwaldstättersees in der Schweiz anzugeben.

4. Die Tiefe, und zwar:

a) Die maximale Tiefe;

b) die mittlere Tiefe; man erhält sie, indem man das Volumen des Sees durch das Areal seiner Oberfläche dividiert;

c) das Verhältnis zwischen mittlerer und maximaler Tiefe gibt bei einfach gebauten Seen Aufschluß über die mehr oder weniger konische Gestalt des Beckens;

d) das Verhältnis zwischen der maximalen Tiefe und der Quadratwurzel aus der Oberfläche gibt in den meisten Fällen befriedigenden Aufschluß über die rela-

tive Tiefe des Sees, d. h. über das Verhältnis seiner Tiefe zu seiner horizontalen Ausdehnung.

5. Das Volumen des Sees. Dieser Wert ist für die Vergleichung der Wassermassen der Seen von erheblicher allgemeiner Bedeutung.

6. Der mittlere Böschungswinkel des Seebeckens. Verschiedene Geographen, die sich mit der Morphometrie der Seen beschäftigten, haben den mittleren Böschungswinkel der Seebecken bestimmt [1]). Man erhält denselben, indem man die Summe der Längen der einzelnen aequidistanten Isobathen mit der Höhe ihrer Aequidistanz multipliziert und das Produkt durch das Areal der Seeoberfläche dividiert [2]).

$$B = \frac{h}{G} (\Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3 \ldots)$$

Es bedeutet hier B die mittlere Böschung des Seebeckens und zwar in Prozenten, Λ die Länge einer Isobathe, G das Areal der Seeoberfläche und h die Aequidistanz der Isobathen.

Die Kenntnis dieses Wertes mag für einfach gebaute Seen nützlich sein. Für Seen mit zahlreichen Buchten und Nebenbecken ist dies hingegen kaum der Fall.

Man ist in der Bestimmung des Böschungswinkels noch mehr ins Detail gegangen, indem man die mittlere Böschung der Gehänge in den verschiedenen Tiefen des Sees berechnet hat [3]). Man erhält diesen Wert (B_1), indem man die halbe Summe der Länge der zwei begrenzenden Isohypsen (Λ_1 und Λ_2) mit der vertikalen Höhe, welche sie trennt, multipliziert und die Summe durch die von den beiden Isohypsen begrenzte Horizontalfläche ($g_2 - g_1$) dividiert.

---

1) Vergl. A. Penck, Morphologie I. 47 und f., II. 215. — A. Penck, Morphometrie des Bodensees. Jahresbericht der geograph. Gesellsch. München XV. 1892/93. S. 119.

2) Ich gebrauche dieselben Buchstaben wie Penck.

3) Vergl. A. Penck, Morphometrie des Bodensees. Jahrbuch d. geogr. Gesellsch. München S. 119. — Halbfaß, Morphometrie des Genfer Sees. Zeitschrift d. Gesellsch. f. Erdkunde XXXII. 47. Berlin 1897.

$$B_1 = \frac{h\,(\Lambda_1 + \Lambda_2)}{2\,(g_2 - g_1)}$$

Man erhält auf diese Weise Werte, die in den verschiedenen Tiefen des Sees sehr abweichen. Angesichts der großen Verschiedenheiten in der Natur des Bodens der einzelnen Regionen des Sees, glaube ich nicht, daß solche Zahlen, von einzelnen Ausnahmefällen abgesehen, brauchbare Resultate liefern. Was hat es für einen Zweck, die mittlere Böschung einer Zone zu berechnen, die zum Teil aus den Hängen des Deltas, zum Teil aus denen der Uferbank, zum Teil aus denen der Ein- und Ausgangsböschung des Seebeckens besteht?

Dagegen kann der Vergleich des Neigungswinkels in verschiedenen Tiefen des gleichen Profiles, oder bei verschiedenen Regionen in gleicher Tiefe interessante Resultate ergeben. Die Neigungswinkel der natürlichen Hänge des Sees, seiner felsigen Wände, seiner Schutt- und Schwemmhalden, seiner Wildbach- und Flußdeltas sind sehr verschieden und ihre ziffermäßige Feststellung von hohem Interesse.

Man mißt den Neigungswinkel am bequemsten durch seine Tangente, die man erhält, indem man den Höhenunterschied zweier auf der Linie des größten Gefälles befindlicher Punkte durch ihre Horizontaldistanz dividiert.

7. Die hypsographische Kurve. Das geeignetste Mittel, um die Form eines Seebeckens genau auszudrücken, scheint mir Pencks hypsographische Kurve [1]) zu sein, da sie bei einfach gebauten Seen Resultate liefert, die sich leicht vergleichen lassen. Man erhält sie vermittelst eines rechtwinkeligen Koordinatensystems, in das man die Größen der von den verschiedenen Isobathen eingeschlossenen Areale als Abscissen, die Tiefen dieser Isobathen als Ordinaten einträgt. Die so konstruierte Kurve ist ganz verschieden, je nachdem sich das Seebecken mehr der Form eines Hohlcylinders, eines Hohlkegels oder einer Wanne fast ohne Tiefe nähert.

---

1) Penck, Morphologie I. S. 43. Stuttgart 1894.

Doch glaube ich, daß man auf einfachere Weise durch Vergleichung verschiedener, in angemessener Richtung gezogener Querprofile verschiedener Seen zum gleichen Resultate gelangt.

8. Die Uferentwickelung und damit die Gliederung des Sees wird am besten durch das Verhältnis der wahren Länge der Uferlinie zum Umfang des dem Seeareal inhaltsgleichen Kreises ausgedrückt. Je größer dieses Verhältnis, desto mehr ist der See durch Buchten und Vorgebirge gegliedert.

Es ergibt sich folgende Formel:

$$U = \frac{\lambda}{2\sqrt{G\pi}}$$

wo U das Maß der Gliederung, λ die Länge der Uferlinie[1]) und G die Oberfläche des Sees bedeutet.

Dieses Verfahren kann jedoch in keiner Weise bei einem See, der sich in einzelne Becken gliedert, die Schilderung dieser Gliederung ersetzen.

9. Die Insulierung[2]). Die Gegenwart einer größeren oder kleineren Zahl von Inseln kleineren oder größeren Umfangs gibt einem See einen ganz eigenen Charakter. Man kann die Insulierung ziffermäßig durch das Verhältnis des Inselareals zum Totalareal des Sees, die Inseln inbegriffen, ausdrücken.

Noch zahlreiche andere Verfahren sind vorgeschlagen worden, um die Formen eines Sees numerisch auszudrücken; doch durften sie stets nur eine beschränkte Anwendung finden. Die Individualität jedes Sees ist meistens so stark ausgeprägt, daß es zwar unter Umständen möglich ist, bei zwei Seen ein bestimmtes, in Zahlen ausgedrücktes Verhältnis zu vergleichen; so-

---

1) Um vergleichbare Werte für verschiedene Seen zu erhalten, sollte die Messung der Länge der Uferlinie möglichst auf Karten gleichen Maßstabes vorgenommen werden, weil naturgemäß mit dem Maßstab der Karte die Zahl der einzelnen Krümmungen der Uferlinie und damit deren Länge wächst.

2) K. Ritter, Ueber die geographische Stellung und horizontale Ausbreitung der Erdteile. Vorgetragen in der kgl. Akademie der Wissenschaften. Berlin 1826. Abgedruckt in seiner Einleitung zur allgemeinen vergleichenden Geographie. 1832.

bald man aber einen dritten oder vierten See heranzieht, paßt die angewandte Methode nicht mehr. Im allgemeinen sind daher Verhältniszahlen, durch die Eigentümlichkeiten der Form des Seebeckens ausgedrückt werden, von den ganz wenigen oben angeführten abgesehen, nicht direkt vergleichbar. Wir verweisen diejenigen, die auf die numerische Wiedergabe der Einzelheiten des topographischen Reliefs besonderen Wert legen, auf das ausgezeichnete Kapitel über Morphometrie in Pencks mehrfach citiertem Werk, wo die einschlägigen Methoden ausführlich geschildert werden[1]).

XI. Altersstufen des Sees.

Die Ablagerung fluviatiler und lacustrer Anschwemmungen führt notwendig zur Auffüllung des Seebeckens; der durch das Wasser eingenommene Raum verkleinert sich fortwährend. Ein See ist daher stets eine vergängliche Erscheinung, die im Laufe der Jahre oder besser der Jahrhunderte und Jahrtausende verschiedene Wandlungen durchmacht und schließlich verschwindet. Wir bezeichnen die verschiedenen Phasen dieser Wandlungen als die Altersstufen des Sees.

Erste Phase: das Jugendalter. Die Anschwemmungen haben auf die Form des Seebeckens noch keinen merkbaren Einfluß ausgeübt; das ursprüngliche Relief der Wanne mit allen seinen Einzelheiten ist weder durch fluviatile, noch durch lacustre Alluvionen verändert.

Zweite Phase: das Reifealter. Die Seealluvionen haben rings um den See eine Uferbank gebildet. Aus den groben fluviatilen Geschieben sind an der Mündung der Zuflüsse ober- und unterseeische Schuttkegel (Deltas) entstanden; feiner fluviatiler Schlamm hat sich auf der Sohle des Sees abgesetzt und dieselbe eingeebnet. Noch aber sind nicht alle Züge der ursprünglichen Wanne durch die Anschwemmungen verdeckt; in einzelnen Regionen schimmern die Einzelheiten der ursprüng-

1) Penck, Morphologie I. S. 33 ff. Stuttgart 1894.

lichen Form noch durch die dünne abgesetzte Schlammschicht durch.

Dritte Phase: das Greisenalter. Die Alluvionen herrschen überall vor. Die Wände der ursprünglichen Wanne sind überall unter denselben verschwunden; das ganze Seebecken besteht nurmehr aus einer centralen, horizontalen, von den Halden des Deltas und der Uferbank eingefaßten Ebene.

Vierte Phase: der See ist zum Weiher geworden. Die centrale Ebene ist durch die fortwährende Zufuhr von Schlamm hoch aufgeschüttet worden und befindet sich in ein und derselben Höhe mit der Uferbank. Es gibt im Seebecken keine Böschungen mehr, außer derjenigen des Strandes. Ein Weiher ist ein See ohne Tiefe; er kann in seiner ganzen Ausdehnung von der littoralen Seeflora besiedelt werden.

Fünfte Phase: der Weiher ist zum Sumpf geworden, wenn durch die fortschreitende Aufschüttung seine Tiefe so sehr abgenommen hat, daß seine submerse Wasserflora durch eine oberseeische Sumpfflora ersetzt wird.

Was die Pflanzengesellschaften anbetrifft, so ist die Flora der Seen und Weiher charakteristisch für „lebendes Wasser". Die von der Mutterpflanze abgetrennten Stücke von Wasserpflanzen (Potamogeton, Myriophyllum etc.) leben weiter und reinigen durch die Funktionen des Chlorophylls das Wasser; Seen und Weiher sind daher von frischem Wasser erfüllt. Die Sumpfflora hingegen (Schilfrohr, Typhaceen, Cyperaceen etc.) ist bezeichnend für stagnierendes, „totes" Wasser; Bruchstücke dieser Pflanzen faulen rasch oder vertorfen und lassen das Wasser bald stinkend werden.

Wenn ich Weiher und Sumpf als Entwickelungsstadien eines Sees bezeichne, so soll damit nicht gesagt sein, daß jeder Weiher und jeder Sumpf ein an seine äußerste Altersgrenze angelangter See sei. Beide können auch ganz anderen Ursachen ihre Entstehung verdanken. Hingegen wird jeder See einmal zum Weiher und schließlich zum Sumpf, es sei denn, daß durch irgend eine Ursache seine normale Entwickelung gestört wird.

Gibt es nun nicht auch andere Vorgänge, die einen See erlöschen lassen? Mit Ausnahme der Endseen besitzt

jeder See einen oberirdischen oder einen unterirdischen Abfluß. Dieser Abfluß erodiert sein Bett, erweitert und vertieft es, so daß die Wasserabfuhr immer größer wird. Daraus resultiert ein progressives Sinken des Wasserspiegels, bis endlich der See zum Fluß selbst geworden ist. Theoretisch ist das richtig; in Wirklichkeit aber ist dieser Vorgang nur von geringer Bedeutung, da er sich äußerst langsam vollzieht. Denn das durch den Abfluß entführte Wasser ist Seewasser und enthält daher keine suspendierten Schlamm- und Sandmassen, geschweige denn Geschiebe, vermittelst deren es erodieren könnte. Die mechanische Erosion, die es durch Reibung an den Wandungen seines Bettes ausübt, ist daher sehr gering. Erodieren kann der Abfluß eines Sees nur

1. durch mechanisches Mitreißen von lose daliegendem Material. Besteht das Bett aus lockeren Materialien verschiedenen Korns, so können Geschiebe durch Wirbel und Wasserschwalle fortbewegt werden, aber doch nur langsam;

2. durch chemische Lösung. Die Gesteine des Abflußbettes werden allmählich gelöst.

In der Mehrzahl der Fälle können diese beiden Wirkungen ihrer Langsamkeit wegen vernachlässigt werden.

Ganz anders verhält es sich mit den tektonischen Veränderungen, die das Bett des Abflusses unterhalb des Sees treffen; sie beeinflussen stets den Wasserstand des Sees. Diese Erscheinungen stehen jedoch in innigem Zusammenhang mit der Entstehung der Wanne. Wir können sie hier, wo wir nur die normale Entwickelungsgeschichte des Sees verfolgen, nicht erörtern.

Zweiter Teil.

Das Wasser des Sees.

I. Kapitel.

Hydrologie (Wasserhaushalt).

1. Speisung des Sees; Wasserzufuhr.

Jeder See wird durch Wasserzufuhr gespeist. Das in der Wanne sich sammelnde Wasser stammt aus der Atmosphäre und gelangt in den See entweder direkt als Niederschlag (Regen, Schnee, Hagel), der in den See fällt oder sich an dessen Oberfläche kondensiert, oder indirekt als Flußwasser, das sich durch offene oder unterirdische Ströme, Flüsse, Bäche, Quellen etc. in den See ergießt. Die Größe der Niederschlagsmengen, die in den See fallen, hängt von den klimatischen Verhältnissen der Region ab, in der der See liegt, und ist auf demselben See von Ort zu Ort und von Zeit zu Zeit verschieden. Die Wassermenge der Flüsse hängt ab:

a) von der Größe des Einzugsgebietes;

b) von der relativen Feuchtigkeit, die die Häufigkeit der Niederschläge im Einzugsgebiet bedingt, und von der absoluten Feuchtigkeit, die deren Menge bestimmt;

c) von der Lufttemperatur, die die Größe der absoluten und der relativen Feuchtigkeit beeinflußt, und deren Sinken zur Kondensation des Wasserdampfes der Luft führen kann;

d) vom Klima im allgemeinen; hiervon hängt es ab, ob in gewissen Jahreszeiten wässerige und infolgedessen sofort abfließende Niederschläge fallen oder aber Schnee, der liegen bleibt, bis er schmilzt und erst nachträglich in flüssiger Form abfließt;

e) von der geologischen Beschaffenheit des Bodens des Einzugsgebietes; je nachdem dieser größere oder geringere Wassermassen zurückzuhalten vermag und mehr oder weniger durchlässig ist, ändert sich die Wasserführung der Flüsse. Auch die Pflanzenbedeckung des Einzugsgebietes ist von Einfluß.

Im allgemeinen nimmt man an, daß in gemäßigten Klimaten die Menge des durch Flüsse abgeführten Wassers etwa ein Drittel der Niederschlagsmenge beträgt. Die anderen zwei Drittel verdunsten.

2. Wasserabfuhr.

Verdunstung. Das im See verweilende Wasser erleidet Verluste, wenn wir vom Abfluß absehen, einzig durch Verdunstung. Wenn auch im Beginn der Entstehung des Seebeckens die Wände der Wanne vielleicht durchlässig waren und so eine gewisse Menge Wasser versickern konnte, so hört doch gar bald jede Möglichkeit eines Einsickerns auf. So ist in der That die Verdunstung von der Wasserfläche der einzige Vorgang, der der Wasserzufuhr entgegenarbeitet. Während Kondensation an der Oberfläche des Sees erfolgt, sobald der Taupunkt der dem Wasser anliegenden Luft höher ist, als die Wassertemperatur, tritt Verdunstung ein, sobald der Taupunkt der Luft unter die Temperatur des Wassers sinkt. Verdunstung und Kondensation wechseln infolgedessen je nach den Witterungsverhältnissen und dem Klima fortwährend miteinander ab.

Wie groß die Verdunstung von der Oberfläche eines Sees ist, wissen wir nicht. Aus einzelnen systematischen, auf dem Lande angestellten Beobachtungen geht ganz allgemein hervor, daß in gemäßigten Klimaten die Verdunstungshöhe von kleinen Wasserflächen ungefähr der

Niederschlagshöhe gleich ist. In feuchten Gegenden ist sie kleiner, in trockenen größer als die Niederschlagsmenge. Diese Resultate mögen im großen und ganzen richtig sein. Keinesfalls ist es jedoch gestattet, die gefundenen Zahlen auf die Verdunstung an der Oberfläche größerer Seen zu übertragen, über welchen die Luft häufiger als über festem Lande gesättigt ist. Der numerische Wert der Verdunstung von der Seeoberfläche, wie er so oft in der Berechnung der Hydrotechniker figuriert, ist thatsächlich noch ganz unbekannt[1]). Seine Bestimmung wäre von höchstem Wert.

Wenn die Wasserzufuhr durch Flüsse und Niederschläge größer ist, als die Verdunstung, so steigt der Wasserspiegel; er fällt, wenn die Verdunstung überwiegt. Da die beiden einander entgegenwirkenden Faktoren veränderlich sind, ändert sich auch fortwährend der Wasserstand des Sees. Wenn die trockene Jahreszeit sehr lange dauert und die Verdunstung weit über den Niederschlag überwiegt, kann der Fall eintreten, daß sämtliches Wasser verdunstet und der See austrocknet. Der See ist dann temporär und existiert nur während der nassen Jahreszeit. Von diesem Gesichtspunkte aus lassen sich unterscheiden permanente Seen, in denen stets Wasser vorhanden ist, und temporäre Seen, die während der trockenen Jahreszeit verschwinden. Das Verhältnis des Zeitraumes, in dem der See ausgetrocknet ist, zu dem Zeitraum, wo das Becken mit Wasser erfüllt ist, wechselt je nach den klimatischen Verhältnissen in den weitesten Grenzen.

Abflüsse. Wenn die Wasserzufuhr größer ist als die Verdunstung, was in manchen Gegenden stets, in anderen während der feuchten Jahreszeit der Fall ist, dann steigt der Wasserstand des Sees; es kann sich das ganze Becken bis zum Ueberfließen mit Wasser füllen:

---

[1]) Einige Ausnahmen sind hier allerdings zu machen. Nach Beobachtungen zu Bombay z. B. findet S. Tomlinson die jährliche Verdunstung von einer großen Wasserfläche von 1 m² zu 2,17 m, von einem Reservoir von 100000 m² zu 1,93 und von einem See von 1—10 km² zu 1,89 m. Quarterly Journal R. Met. Soc. London XX. (1894) 63.

Der See erhält einen Abfluß, dessen Wasserführung den Wasserstand des Sees bestimmt.

Der Abfluß kann unterirdisch sein, z. B. durch eine Spalte oder eine Kluft in den Wandungen der Wanne erfolgen. In diesem Falle hängt die Wasserführung des Abflusses, gleichen Querschnitt vorausgesetzt, vom Druck der Wassersäule über der Ausgangsmündung ab. Genügt dieser Abfluß nicht, um die Wasserzufuhr auszugleichen, so steigt das Wasser, bis ein zweiter, dritter u. s. f. höher gelegener unterirdischer Abfluß in Thätigkeit tritt. Jeder strebt nach Kräften den See zu entleeren. Ist die Wasserabfuhr durch den unterirdischen Abfluß der Wasserzufuhr gleich, so stellt sich ein Gleichgewicht ein. Der Seespiegel hört auf zu steigen und behält fernerhin annähernd die gleiche Höhe bei.

Fehlt jedoch ein unterirdischer Abfluß oder ist die Kapazität der unterirdischen Gänge zu gering, so steigt der See immer höher, bis sein Wasser schließlich überläuft: Der See erhält einen offenen Abfluß.

Die Wasserführung des Abflusses ist eine Funktion der Höhe des Wasserstandes im See. Das Wasser steigt in der Wanne so lange, als die Wasserzufuhr die Wasserabfuhr übertrifft. Sind beide Größen gleich geworden, so hört das Steigen auf und ein stationärer Zustand tritt ein.

Ausnahmsweise kann ein See zwei Abflüsse haben, wie z. B. der Lesjö, ein Paßsee in Norwegen, der zugleich Raume und Logen speist.

So kann die Wasserabfuhr außer durch Verdunstung auch durch einen oder mehrere unterirdische und einen (selten zwei) oberirdische (offene) Abflüsse erfolgen. Die Mehrzahl der Seen der gemäßigten und der polaren Zonen besitzt jedoch nur einen einzigen Abfluß, und zwar einen offenen, den Abfluß schlechthin *(émissaire)*.

Der Wasserstand eines Sees hängt ab:

a) von der Größe der Wasserzufuhr, d. h. des Niederschlags und der Zuflüsse;

b) von der Größe der Wasserabfuhr durch Verdunstung und durch Abflüsse. Bezeichnet man mit *Da*

die Größe der Wasserzufuhr, mit *De* die Größe der Wasserabfuhr in Kubikmetern pro Sekunde und mit *S* den Flächeninhalt des Sees in Quadratkilometern, so lassen sich die Höhenänderungen (h in Metern) des Seespiegels, die in t Sekunden erfolgen, durch folgende Gleichung ausdrücken[1]):

$$h = t \frac{(Da - De)}{S \,.\, 1000000}.$$

3. Süßwasserseen und Salzseen.

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß man nach dem Verhältnis der Größe des Sammelgebietes zur Größe der Wanne, sowie nach den klimatischen Bedingungen, die die Wasserzufuhr und Wasserabfuhr regeln, verschiedene Seetypen unterscheiden kann, nämlich: temporäre Seen und permanente Seen. Die Seen können ferner eingeteilt werden in Seen ohne Abfluß oder Endseen und Seen mit Abfluß oder Flußseen. Die temporären Seen sind fast stets Endseen, während wir unter den permanenten Seen sowohl Endseen als Flußseen treffen.

Unter den Flußseen lassen sich ferner unterscheiden: Flußseen mit intermittierendem Abfluß und Flußseen mit konstantem Abfluß.

So ergibt sich schließlich folgende Klassifikation:

Seen	temporäre Seen	Endseen	
	permanente Seen	Flußseen	mit intermittierendem Abfluß.
			mit konstantem Abfluß.

Diese Unterscheidung ist von größter Wichtigkeit. Wie wesentlich sie ist, zeigt sich besonders in der Beschaffenheit des Wassers der Seen dieser verschiedenen Gruppen. Das Wasser, das dem See zugeführt wird, ist niemals chemisch rein; es enthält immer eine Reihe mineralischer Bestandteile in Lösung. Die Verdunstung

---

1) Ganz streng gilt diese Formel nur bei senkrechten Wandungen des Seebeckens im Bereich der Schwankungen. Bei schrägen Böschungen, wie sie stets vorhanden sind, ändert sich der Wert *S* von Wasserstand zu Wasserstand. Vergl. hierüber Brückner, Klimaschwankungen. Wien 1890. S. 87.

hingegen entführt nur reines Wasser und etwa flüchtige Bestandteile. Infolgedessen bereichert sich das Wasser der Endseen, deren Wasser nur durch Verdunstung entzogen wird, immer mehr mit gelösten Substanzen, unter Umständen bis zur Sättigung. Endseen sind daher salzig; sie sind Salzseen. Was für Salze und in welchem Verhältnis sie im Seewasser enthalten sind, hängt von den Gesteinen ab, die das Einzugsgebiet zusammensetzen.

Der relative Salzgehalt wechselt je nach dem Volumen, also je nach dem Wasserstand des Sees. Bei Hochwasser ist die Lösung verdünnt; sinkt aber der Wasserstand, so konzentriert sie sich. In den temporären Seen werden, wenn das Wasser verdunstet, die salzigen Bestandteile ausgeschieden und auf dem Grund des Beckens abgelagert. Füllt sich das Becken wieder mit Wasser, so kann dieser Niederschlag ganz oder teilweise wieder gelöst werden[1]).

In den Flußseen hingegen findet eine solche Anhäufung von Salzen nicht statt. Der Abfluß entführt die durch die Zuflüsse herbeigebrachten gelösten Substanzen regelmäßig zusammen mit dem Seewasser. Der Salzgehalt eines solchen Sees ist folglich gleich dem mittleren Salzgehalt der Zuflüsse, sofern man von der in der Regel geringen Wirkung der Verdunstung absieht. Das Wasser solcher Seen ist daher süß, sobald der Abfluß dauernd ist und das Wasser der Zuflüsse nicht etwa einen großen Salzgehalt aufweist.

Ist der Abfluß intermittierend, so nimmt der Salzgehalt des Sees während des niederen Wasserstandes, solange der Abfluß unthätig ist, zu; die Lösung konzentriert sich durch die Wirkung der Verdunstung, einerlei wie der Salzgehalt der Zuflüsse ist. Tritt Hochwasser ein, so vermindert sich der Salzgehalt, solange der Abfluß funktioniert. In solchen Fällen hängt der Salzgehalt von der Länge der Zeit ab, während deren der Abfluß thätig ist, so wie selbstverständlich auch vom Salzgehalt der Zuflüsse. Seen mit intermittierendem Abfluß haben

---

[1]) Vergl. Obrutschew über die Takyre in Turkestan. Ref. in Petermanns Mitteilungen 1895. Litteraturbericht Nr. 175.

deshalb meistens mehr oder weniger brackiges Wasser. Von diesem Gesichtspunkt aus lassen sich die Seen wie folgt klassifizieren:

Als Salzwasserseen treten uns entgegen die temporären und die permanenten Endseen,

als Brackwasserseen die Flußseen mit intermittierendem Abfluß und

als Süßwasserseen die Seen mit permanentem Abfluß.

4. Verweilen des Wassers im See.

Die Dauer des Verweilens des Wassers im See hängt ab

a) vom Volumen des Sees,

b) von der Wasserführung des Abflusses.

Sei V das Volumen des Sees, D die Wasserführung des Abflusses, so drückt $\frac{V}{D}$ die Dauer des Verweilens des Wassers im See aus. Es soll damit nicht gesagt sein, daß die Dauer dieses Aufenthaltes für sämtliche durch die Zuflüsse oder den Regenfall herbeigebrachten Wassertropfen gleich groß sei; denn diese werden durch die Strömungen mit sehr verschiedener Geschwindigkeit und in sehr verschiedener Zeit von ihrer Einmündungsstelle zu ihrer Ausmündungsstelle transportiert. Wir sprechen hier nur von der mittleren Dauer des Aufenthaltes eines Wasserteilchens im See. Diese ist oft sehr lang. Nehmen wir als Beispiel die Verhältnisse im Genfer See. Das Volumen desselben beträgt 88920 Millionen Kubikmeter, die Wasserführung des Abflusses im Mittel 252 m^3 in der Sekunde. Folglich verbleibt das Wasser während 11,2 Jahren im See.

Während dieser Zeit ist das Wasser verschiedenen Einwirkungen unterworfen, durch welche es gemischt und verändert wird. Das Flußwasser und das Regenwasser wird im See zum Seewasser, das sich von jenen wie vom Sumpfwasser, vom Quellwasser, Grundwasser u. s. w. unterscheidet. Dabei hat das Wasser

jedes Sees seine besonderen Eigenschaften. Ein Flußsee ist also eine zufällige Erscheinung im Laufe des Flusses, durch welche dieser wesentlich modifiziert und umgestaltet wird. Sein Abfluß ist nichts anderes als die algebraische Summe seiner Zuflüsse, wobei die Verdunstung als negativer Zufluß zu betrachten ist.

Besprechen wir kurz die Modifikationen, die das Flußwasser im See erleidet, deren genaue Darlegung einem späteren Abschnitt vorbehaltend.

a) Die Zuflüsse entledigen sich bei ihrem Eintritt in den See durch Sedimentation ihrer Sinkstoffe. Der Abfluß führt klares Seewasser.

b) Hinsichtlich seiner chemischen Zusammensetzung stellt das Seewasser, sowohl räumlich als auch zeitlich, das Mittel des Wassers seiner Zuflüsse dar. In jedem Fluß mischen sich die Wasser seiner verschiedenen Zuflüsse infolge der Bewegung des Fließens, der Wirbel und Schwalle, vollständig; doch ändert sich die Zusammensetzung des Wassers je nach der Wasserführung und nach der Jahreszeit. Diese zeitlichen Schwankungen verschwinden im See, da das Wasser hier so lange verweilt und in dieser Zeit durch Bewegungen aller Art gründlich gemischt wird. Das Wasser des Abflusses ist daher Seewasser von sehr gleichmäßiger und fast konstanter Zusammensetzung.

c) In thermischer Hinsicht besitzt das Wasser eines jeden Zuflusses seine eigene bestimmte, von derjenigen anderer Zuflüsse verschiedene, mit der Jahreszeit wechselnde Temperatur. Alle diese Wassermassen lagern sich im See ihrer Dichte entsprechend übereinander; doch erleiden sie während ihres Aufenthalts im See tägliche, jährliche und cyklische Aenderungen ihrer Temperatur. Der Abfluß führt Wasser, dessen Temperatur derjenigen Schicht des Seewassers entspricht, in der der Abfuhrkanal beginnt. Unterirdische Abflüsse führen deshalb Wasser von der Temperatur der mittleren oder tiefen Schichten des Sees, offene Abflüsse hingegen das Wasser der Oberflächenschichten. Je nach der Form der Bucht, aus der der Abfluß stattfindet, vermischen

sich die Wassermassen der tiefen Schichten mehr oder weniger mit denjenigen der Oberfläche und bedingen so die Temperatur und die Zusammensetzung des Wassers des Abflusses.

d) In Bezug auf die Wasserführung im allgemeinen ist zu bemerken, daß Hoch- und Niederwasser der Zuflüsse sich auch im Seewasserstand geltend machen und folglich auch in der Wasserführung des Abflusses. Die Unterschiede im Wasserstand werden jedoch durch die Verteilung der zugeführten Wassermenge auf die große Fläche des Sees in bedeutendem Maße ausgeglichen. Der See funktioniert als Regulator für die Wasserführung des ihn durchströmenden Flusses[1]).

e) In biologischer Hinsicht ist wichtig, daß der See durch die Zuflüsse die in diesen enthaltenen Organismen erhält. Soweit sie sich an die Existenzbedingungen im See nicht anpassen können, gehen sie früher oder später zu Grunde und tragen durch ihre Leichen zur Vermehrung des Gehalts des Seewassers an organischen Bestandteilen bei. Andere Organismen vermögen sich vollständig den Lebensbedingungen im See anzupassen, siedeln sich an, leben und vermehren sich: sie werden zu einem integrierenden Bestandteil der tierischen und pflanzlichen Bevölkerung des Sees.

Andererseits entführt der Ausfluß Tiere und Pflanzen, die nicht fest haften, aus dem See. Seine Flora und Fauna hat daher einen lacustren Charakter.

Die Wechselwirkungen zwischen dem See und seinen Zu- und Abflüssen sind, wie man sieht, mannigfaltig und wichtig. Ein See ist zwar eine zufällige, dabei aber in seinen Wirkungen wesentliche Erscheinung im Laufe eines Flusses.

5. Limnimetrie.

Limnimetrie nennt man denjenigen Zweig der Seenkunde, der sich mit den Wasserständen beschäftigt.

---

[1]) Ueber die zeitliche Beziehung von Hochwasser im Zufluß und Hochwasser im See vergl. Brückner, Klimaschwankungen. Wien 1890. S. 94.

Die Kenntnisse der limnimetrischen Verhältnisse eines Sees ist für die Anwohner wichtig, da durch Hochwasser die Ufergelände überschwemmt werden, durch Niederwasser hingegen die Schiffahrt leidet. Da der Wasserstand des Sees eine Funktion des Klimas ist, so ist die Limnimetrie auch für die Meteorologen von Wichtigkeit: aus Aenderungen des Wasserstands kann man auf Aenderungen des Klimas schließen und umgekehrt.

Die Höhe des Wasserstandes wird an genau geteilten, fest aufgestellten Pegeln gemessen, deren Skala von geodätischen Fixpunkten aus einnivelliert sein sollte, so daß auch nach zufälliger Zerstörung des Pegels ein neuer genau in derselben Höhe gesetzt werden kann. Außer den einfachen Pegeln gibt es noch verschiedene vervollkommnete Apparate zur Messung des Wasserstandes, so das Limnimeter mit Schwimmer. Dieses Instrument wird in einem mit dem See in Verbindung stehenden Schacht aufgestellt. Der Zeiger des Schwimmers, der je nach dem Wasserstand im Schacht sich hebt oder senkt, bewegt sich vor einer feststehenden Skala. Das selbstregistrierende Limnimeter oder der Limnograph trägt vermittelst eines mit dem Schwimmer verbundenen Stiftes die Wasserstandshöhe auf einen sich abrollenden Papierstreifen auf.

Wie auch das Regime eines Sees sein mag, stets zeigt der Wasserstand drei Arten periodischer Schwankungen.

Die täglichen Schwankungen. Die Zuflüsse zeigen oft einmal am Tage eine Zunahme ihrer Wasserführung; es ist dies besonders während der Schneeschmelze bei Gletscherbächen der Fall, da Schnee und Eis tagsüber stärker abschmelzen als nachts. Diese Schwankungen der Wasserführung der Zuflüsse bewirken nur unbedeutende Schwankungen des Seespiegels, da sich die Wassermassen auf die große Seefläche verteilen. Die täglichen Schwankungen des Wasserstandes im See können daher meist vernachlässigt werden.

Die jährlichen Schwankungen. Die verschiedenen Jahreszeiten sind verschieden feucht und die Niederschläge, die ja hauptsächlich die Flüsse speisen, ungleichmäßig über das Jahr verteilt. Schon daraus folgen Schwankungen in der Wasserzufuhr zum See. Die Jahreszeiten sind aber auch ungleich warm. In polaren

wie auch in gemäßigten Klimaten fällt der Niederschlag im Winter in Form von Schnee. Diese schneeigen Niederschläge werden erst, nachdem sie durch die Wärme des Frühjahrs oder des Sommers geschmolzen sind, durch die Flüsse fortgeführt. Daraus folgen weitere Schwankungen des Wasserstandes der Zuflüsse nach den Jahreszeiten. Endlich ist auch die Verdunstung in der heißen und trockenen Jahreszeit stärker als im Winter und entsprechend variiert auch die Größe der vom See an die Atmosphäre abgegebenen Wassermenge. Die Bedeutung dieses letzten Umstandes tritt besonders an Seen tropischer und trockener Gegenden scharf hervor. Aber auch die Wasserführung der Zuflüsse wird durch die Verdunstung von ihrem Eingangsgebiet beeinflußt.

Aus dieser wechselnden Wasserzufuhr und Wasserabfuhr ergeben sich Wasserstandsschwankungen des Sees, die jährlich in bestimmter Reihenfolge wiederkehren. Je nach der Jahresperiode des Wasserstandes lassen sich folgende Typen von Seen unterscheiden:

a) Seen heißer Klimate. Hochstand während der Regenzeit, Tiefstand während der trockenen Zeit (z. B. die Schotts und Sebkas, die großen afrikanischen Seen).

b) Seen gemäßigter Klimate. Im Winter zur Zeit der Schneefälle steht der See tief. Im Frühling zur Zeit der Schneeschmelze steigt der See; im Sommer, während der warmen Periode mit starker Verdunstung, sinkt er [1]), um im feuchten Herbst wieder zu steigen.

c) Seen polarer Klimate. Im Winter ist alles gefroren und der See steht tief. Im Sommer tritt allgemeines Schmelzen des Schnees und der Eismassen ein; die Flüsse sind wasserreich und die Seen zeigen Hochstand.

Die subalpinen [2]) Seen folgen gleichzeitig dem Typus

---

[1]) Nur in streng kontinentalen Regionen, wo der Einfluß der größeren Verdunstung des Sommers durch ein besonders starkes Sommermaximum der Niederschläge wett gemacht wird, haben wir Sommerhochstand der Seen. Vergl. im übrigen Woeikof, Seen und Flüsse als Produkte des Klimas. Zeitschr. d. Gesellsch. f. Erdkunde zu Berlin 1885. S. 92.

[2]) Mit dem Ausdruck subalpin bezeichnen wir im allgemeinen nicht nur die am Fuß der zentraleuropäischen Alpen, sondern auch jede andere analoge, am Fuße eines hohen Gebirges gelegene Region.

gemäßigter und demjenigen polarer Gegenden. Ersterer wird ihnen aufgedrückt durch ihre dem Flachland angehörenden, letzterer durch ihre in der alpinen Region entspringenden Zuflüsse. Wir beobachten an ihnen im Winter wegen der Frostdürre Niederwasser, im Frühling wegen der Schneeschmelze in den Ebenen und auf den Voralpen, sowie wegen der Frühlingsregen, Hochwasser; im Sommer wegen des Abschmelzens der alpinen Schnee- und Gletschermassen, Hochwasser; im Herbst wegen der herbstlichen Regenfälle, denen keine starke Verdunstung mehr die Wage hält, Hochwasser.

d) Cyklische Schwankungen. Daß das Klima periodische Schwankungen aufweist, scheint heute erwiesen zu sein (Brücknersche Klimaperiode)[1]. Auf eine Reihe feuchter, regenreicher Jahre, welche ein Ansteigen der Wasserstandskurve bewirken, folgt eine Reihe trockener Jahre, durch welche die Kurve herabgedrückt wird. Es ist deshalb erlaubt, aus den relativen Wasserstandsänderungen eines Sees auf Variationen des Klimas zu schließen. Solche limnimetrischen Schwankungen treten besonders prägnant an Seen ohne Abfluß (Endseen) oder solchen mit temporärem Abfluß auf. Auch an Seen mit permanentem Abfluß sind sie noch bemerkbar, wenn auch nicht so stark ausgesprochen.

An Seen, deren Abfluß durch künstliche Hindernisse (Schleusen, Dämme) geregelt wird, ist selbstverständlich das natürliche Verhältnis zwischen der Höhe des Wasserstandes im See und der Wasserzufuhr der Zuflüsse mehr oder weniger getrübt.

Außer diesen periodischen, an sich übrigens schon unregelmäßigen Schwankungen, gibt es noch aperiodische Schwankungen; dieselben sind in den meisten Fällen starken Regengüssen, die das ganze Nährgebiet oder einen Teil desselben heimsuchten, zuzuschreiben, einer plötzlichen Schneeschmelze, hervorgebracht z. B. durch einen Föhnsturm, einem durch Erdrutschung bewirkten Stau eines Zuflusses, dem Ausbrechen eines Dammsees oder

[1]) Brückner, Klimaschwankungen. Wien 1890.

sonst irgend einem abnormen Anwachsen eines oder mehrerer Zuflüsse. So spiegelt die limnimetrische Kurve eines Sees, so weit dieser einen natürlichen, nicht durch Wehre oder Dämme gestauten Abfluß besitzt, die Witterungsverhältnisse des Jahres auf das getreueste wieder.

Das Verhältnis zwischen der Höhe des Wasserstandes und der Wasserführung der Zu- und Abflüsse kann durch folgende allgemeine Formel ausgedrückt werden:

$$h = \frac{Z + R - (E + A)}{G}$$

Es bedeutet hier h den Betrag der Zu- oder Abnahme des Wasserstandes in einer bestimmten Zeit, Z die Menge des in der gleichen Zeit durch die Zuflüsse herbeigeführten Wassers, R die Menge des als Regen auf den See gefallenen und an seiner Oberfläche kondensierten Wassers, E die Menge des verdunsteten Wassers, A die Menge des in der gleichen Zeit durch den Abfluß weggeführten Wassers, endlich G die Gesamtoberfläche des Sees.

Es folgt daraus, daß man, wenn die Wasserführung des Abflusses bekannt ist, aus den Wasserstandsschwankungen des Sees die gesamte Wasserführung der Zuflüsse plus Regen minus Verdunstung berechnen kann:

$$Z + R - E = A + h\,G.$$

Die Amplitude der limnimetrischen Schwankungen hängt vom Verhältnis zwischen der Oberfläche des Sees und der Wasserführung der Zu- und Abflüsse ab. Die direkte Beobachtung lehrt uns die größten während eines bestimmten Zeitraumes, z. B. während eines Tages, an einem See vorkommenden Anschwellungen und Abschwellungen kennen. Diese Werte, die eigentlich die limnimetrische Empfindlichkeit des Sees ausdrücken, sind von einem See zum anderen sehr verschieden.

Aus den Beobachtungen ergibt sich ferner die Größe der jährlichen Schwankung, d. h. die Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Wasserstande.

Die mittlere jährliche Schwankung berechnet sich als Differenz zwischen den mittleren Jahresextremen des Wasserstandes. Die mittleren Jahresextreme werden gefunden, indem man aus Beobachtungen, die mehrere Jahre hindurch fortgesetzt wurden, für jedes Jahr die extremen Wasserstände notiert und das Mittel der höchsten

und ebenso das der tiefsten bildet. Nicht unwichtig ist ferner die Kenntnis der Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten bekannten Wasserstand (extreme Schwankung). Unter Umständen ist es von Interesse, die Veränderlichkeit dieser Jahresschwankung zu berechnen und von Jahr zu Jahr die absoluten Extreme und die aus ihnen berechneten Jahresschwankungen abzuleiten.

II. Kapitel.

Hydraulik.

1. Der hydrostatische Druck.

Der Druck, den eine Wassersäule auf einen im Wasser befindlichen Körper ausübt, wird in Atmosphären ausgedrückt. Der Druck einer Atmosphäre ist gleich einem normal auf einen Körper ausgeübten Druck von 1033 g pro cm² oder gleich dem Druck, den eine Säule destillierten Wassers von 4° C. und von 10,33 m Höhe auf ihre Unterlage ausübt. Dieser Wert von 10,33 m Höhe, gleich einem Atmosphärendruck, wird durch die die Dichte des Wassers modifizierenden Faktoren nur in geringem Grade beeinflußt, so daß die hieraus entspringenden Unterschiede in der Mehrzahl der Fälle unberücksichtigt bleiben können.

Als Beweis führen wir die Höhe der Wassersäule an, welche in den extremen in der Natur vorkommenden Fällen dem Druck einer Atmosphäre entspricht.

Die Höhe einer Wassersäule, die einem Atmosphärendruck entspricht, beträgt an der Oberfläche des Gewässers, welche selbst unter dem Druck einer Atmosphäre steht,

bei destilliertem Wasser von 4° C.	10,33 m
bei destilliertem Wasser von 20° C.	10,35 „
bei Süßwasser von 4° C. und 1,0002 Dichte [1]. . . .	10,328 „
bei Meerwasser von 4° und 1,027 Dichte	10,06 „
bei destilliertem Wasser von 4° C., das 2 g Schwebestoffe im Liter enthält	10,31 „

Diese Zahlen ändern sich auch nur wenig mit der Tiefe,

[1] Wasser des Genfer Sees.

da das Wasser kaum komprimierbar ist. Das Wasser in 300 m Tiefe (Genfer See), das einem Druck von 30 Atmosphären ausgesetzt ist, ist so wenig zusammengedrückt, daß hier die Säulenhöhe, die einer Atmosphäre entspricht, bei 4° C. 10,31 m beträgt, also nur 2 cm weniger als an der Oberfläche. Am Grunde des Baikalsees, wo der Druck 137 Atmosphären beträgt, würde die Säulenhöhe 10,26 m sein.

2. Der Seespiegel.

Die Oberfläche des Sees ist ein Segment der Sphäroidfläche der Erde [1]). Der Unterschied der Krümmung der Erdoberfläche in verschiedenen Breiten — die Krümmung ist in den äquatorialen Gegenden stärker als in den polaren — ist so gering, daß wir ihn für unsere Seestudien vernachlässigen können. Wir können daher jede Seeoberfläche als Teil einer Kugelfläche von 6370 km Radius ansehen und berechnen. Die Pfeilhöhe des Bogens, den wir als Schnitt einer vertikalen Ebene mit dem Seespiegel erhalten, hat folgende Werte:

für eine Bogenlänge von	100 m	0,2 mm
„ „ „ „	1 km	1,9 cm
„ „ „ „	10 km	1,9 m

Die durch die Küstenanziehung bewirkte Deformation der Oberfläche ist außerordentlich gering und kann ganz vernachlässigt werden.

3. Denivellationen im allgemeinen.

Wie soeben gesagt, ist die Oberfläche des Sees ein Teil der sphäroidalen Oberfläche oder — mit größter Annäherung — der Kugelfläche der Erde mit dem Radius 6370 km. Diese normale Form des Seespiegels wird aber durch verschiedene Ursachen verändert, sie erleidet Denivellationen. Diese Denivellationen können konstant und temporär sein.

---

1) Wir sehen hier vom Geoid ab.

A) Konstante Denivellationen.

Die Mehrzahl der Faktoren, welche die Oberfläche der Meere in größerem oder geringerem Maße beeinflussen, kommt für die Verhältnisse auf einem See nicht in Betracht, so z. B. die durch die Gezeiten entstehenden Unregelmäßigkeiten, Unregelmäßigkeiten infolge von Strömungen, von Unterschieden in der chemischen Zusammensetzung des Wassers, infolge von Windstau, alles Faktoren, die auf Seen nur von minimalem Einfluß sind und die wir daher übergehen. Nur in Salzseen kann allerdings der Dichteunterschied zwischen dem schweren Seewasser und dem leichten Wasser der Zuflüsse an deren Mündung eine konstante, bemerkbare Denivellation herbeiführen.

Doch gibt es einen den Seen eigentümlichen Vorgang, der gerade hier auf eine Denivellation hinarbeitet und daher speziell berücksichtigt werden muß. Der See erfährt an einem oder mehreren Punkten durch die Zuflüsse eine Vermehrung seiner Wassermasse. Ist er ein Flußsee, so wird ihm Wasser nur an einer bestimmten Stelle durch den Abfluß entzogen. Daraus folgt, daß das Wasser an der Mündung der Zuflüsse höher stehen muß, als am Beginn des Abflusses. Die Oberfläche eines Flußsees ist daher in ganz charakteristischer Weise umgestaltet. An der Mündung jedes seiner Zuflüsse hat sie die Gestalt eines äußerst flachen konvexen Kegels, dessen Spitze in der Mündung des Zuflusses liegt, in der Bucht dagegen, aus der der Abfluß austritt, die eines konkaven Kegels. Auch dieser konkave Kegel ist außerordentlich flach. Von der Einmündungsstelle des Zuflusses zum Austritt des Abflusses findet eine Bewegung des Wassers, eine Strömung statt. Allein die Vergrößerung des Querschnittes, die der Fluß in dem Moment erfährt, wo er in den See tritt, der ja nichts anderes als ein erweiterter Fluß ist, bewirkt, daß diese Strömung äußerst langsam und in Wirklichkeit unmeßbar ist. Nur in kleinen von großen Strömen durchflossenen Seen, z. B. im Untersee am Rhein oder in Engen, die die einzelnen Teile eines sich in ver-

schiedene Becken gliedernden Sees miteinander verbinden, wird sie deutlich bemerkbar.

Die theoretisch notwendige Existenz einer solchen Strömung beweist, daß zwischen der Mündung des Hauptzuflusses und dem Austritt des Abflusses ein Gefälle existiert. Dieses ist allerdings so schwach, daß es sich fast stets der Beobachtung entzieht; es tritt nur unter gewissen Bedingungen und bei Anwendung sehr feiner Messungsmethoden deutlich zu Tag.

B) Temporäre Denivellationen.

Temporäre Denivellationen können durch kosmische Ursachen entstehen — durch die wechselnde Stellung der Erde zu nahen Himmelskörpern. Solche Gezeiten sind bis jetzt nur in einem einzigen See, dem Michigansee beobachtet worden; sie sollen in demselben einige Centimeter Höhe erreichen. Doch wird noch heute ihre Existenz im genannten See von hervorragenden Gelehrten bezweifelt. In mittelgroßen und kleinen Seen sind jedenfalls Gezeiten nicht bemerkbar; sie können folglich vernachlässigt werden.

Temporäre Denivellationen werden aber auch durch atmosphärische Vorgänge hervorgerufen; diese sind häufig und wichtig. So entstehen

a) nichtrhythmische Denivellationen.

Ein über den See hinstreichender Wind treibt das Wasser der Oberfläche von der einen Küste zur gegenüberliegenden. Es entsteht so eine temporäre Denivellation des Seespiegels; an der windgeschützten Küste sinkt, an der windgetroffenen Küste steigt das Wasser. Der Seespiegel ist schief gestellt und zeigt ein Ansteigen zur windgetroffenen Küste.

Diese Deformation nimmt mit der Stärke des Windes zu. Wenn der Wind nachläßt, so nimmt sie ab; tritt Windstille ein, so verschwindet sie ganz. Die größten Denivellationen dieser Art, die ich am Genfer See beobachtet habe, betrugen 12 cm. Je größer der See ist,

desto größer werden auch die so entstandenen Denivellationen sein, gleiche Tiefe vorausgesetzt.

Ist ein See durch Engen in verschiedene Becken gegliedert, so können ganz erhebliche Höhenunterschiede erreicht werden. Am größten sind sie, wenn der See seicht ist. E. v. Cholnoky schildert vom flachen Plattensee Beispiele solcher Denivellationen im Betrage von 25—30 cm[1]).

b) Rhythmische Denivellationen.

In zweierlei Typen treten oscillatorische oder rhythmische Bewegungen oder, kurz, Wellenbewegungen im See auf:

Erstens in Form fortschreitender Oscillationen — in den Wellen schlechthin. Diese oscillatorische Bewegung ist auf die Oberfläche beschränkt und zieht nur die oberen Schichten des Wassers in Mitleidenschaft.

Zweitens in Form stehender Wellen. Bei ihnen handelt es sich um Bewegungen der ganzen Wassermasse des Sees bis in die größten Tiefen hinunter. Diese stehenden Wellen werden von den Anwohnern des Genfer Sees *Seiches* genannt. Es ist dem Verfasser wie dem Uebersetzer nicht gelungen, eine einwurfsfreie Verdeutschung dieses Wortes zu finden. Wir haben uns daher entschlossen, den französischen Lokalausdruck auch in die deutsche limnologische Terminologie aufzunehmen und werden in der Folge diese eigentümlichen stehenden Wellen kurzweg mit dem Namen Seiches (sprich *Säsch*) bezeichnen.

4. Die fortschreitenden Wellen oder die Seewellen schlechthin.

Jeder Stoß, der einen Punkt einer stehenden Wassermasse trifft, bewirkt an der betreffenden Stelle eine Verschiebung der Wassermoleküle aus ihrer Ruhelage, die sie erst nach einer Reihe von Schwingungen wieder an-

[1]) Resultate der wissenschaftlichen Erforschung des Plattensees. I. II. S. 34. Wien 1897.

nehmen. Bei diesen Schwingungen beschreibt jedes Molekül eine geschlossene Kreisbahn. Ein Teilchen aber kann eine solche schwingende Bewegung nicht ausführen, ohne daß die benachbarten Teilchen in Mitleidenschaft gezogen werden. Die Bewegung pflanzt sich infolgedessen successive von einem Molekül zum anderen fort. Durch diese Oscillationen wird die Wasseroberfläche deformiert. Es treten Wellen auf, deren Querprofil in jedem Moment nach oben durch eine Kurve begrenzt wird, die eine Trochoide [1]) ist.

Wellen sind langgestreckte untereinander parallele Wasserrücken, die Wellenkämme oder Wellenberge, zwischen denen die Wellenthäler liegen. Wellenkämme und -thäler bewegen sich gleichzeitig und mit gleicher Geschwindigkeit vom Entstehungsort der Welle fort und zwar so, daß während einer ganzen Periode der Welle derselbe Oberflächenpunkt des Wassers der Reihe nach einem Wellenkamm, dann einem Wellenthal und schließlich wieder einem Wellenkamm angehört.

Auf die Theorie der Wellenbewegung kann ich hier nicht näher eingehen; ich verweise den Leser auf die Arbeiten über die Wellen des Meeres, deren Resultate Krümmel [2]) ausgezeichnet zusammengefaßt hat. Für unsere Seenkunde genügt es, im nachfolgenden die wichtigsten elementaren Thatsachen zusammenzufassen.

Als Wellenlänge (λ) bezeichnet man den Abstand der homologen Punkte zweier benachbarter Wellen voneinander, z. B. den Abstand zwischen zwei Kämmen.

Wellenhöhe ($2h$) wird der vertikale Abstand zwischen dem höchsten Punkt des Wellenkammes und dem tiefsten des Wellenthales genannt, oder anders gesagt, der Abstand zwischen dem Wellenkamm und der Ruhelage des Wasserspiegels vermehrt um den Abstand dieser Ruhelage vom Wellenthal (Fig. 3).

$$AB + CD = 2h$$

1) Trochoide nennt man die Kurve, die ein innerhalb eines Kreises gelegener Punkt beschreibt, während der Kreis auf einer geraden Linie fortrollt.

2) O. Krümmel, Ozeanographie II. 1. 137. Stuttgart 1887.

AB ist nicht absolut genau gleich *CD*, da die Mittelpunkte der Kreisbahnen, die die Wasserteilchen bei der Wellenbewegung beschreiben, nicht mit der Ruhelage zusammenfallen, sondern etwas höher liegen. Die Differenz ist jedoch so klein, daß wir sie hier vernachlässigen.

Schwingungsweite (ρ) der Welle wird der Radius des Kreises genannt, den ein Molekül an der Oberfläche bei der Wellenbewegung beschreibt. Die Schwingungsweite der Punkte der unter der Oberfläche liegenden tiefen Schichten 1, 2, 3 . . . wird durch ρ_1, ρ_2, ρ_3 . . . ausgedrückt.

Periode der Welle (t) nennt man die Zeit, welche die Welle braucht, um eine Strecke gleich ihrer eigenen

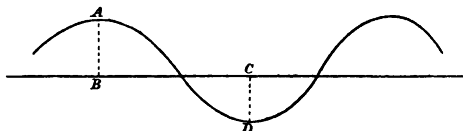


Fig. 3. Höhe der Wellen.

Länge zu durchlaufen, oder anders ausgedrückt, die Zeit, die verstreicht von dem Moment, in dem ein Wellenkamm einen Fixpunkt passiert, bis zum Moment, in dem der nächste Wellenkamm den gleichen Fixpunkt erreicht. Diese Zeit ist gleich der Zeit, die ein Wasserteilchen zur Ausführung einer ganzen kreisförmigen Schwingung, zur Zurücklegung einer ganzen Kreisbahn braucht.

Geschwindigkeit der Welle (v) nennt man die während einer Zeiteinheit vom fortschreitenden Wellenkamm zurückgelegte Strecke.

Wellenlänge und Wellenhöhe werden in Metern, die Periode in Sekunden, die Geschwindigkeit in Metern per Sekunde ausgedrückt.

Die Vorderseite einer Welle ist derjenige Abhang des Wellenberges, der nach der Richtung schaut, in der die Welle fortschreitet, die Rückseite der entgegengesetzte. Bei den durch Wind erregten Wellen ist die Vorderseite die Leeseite, die Rückseite die Luvseite.

Die allgemeinen Eigenschaften der Wellen lassen sich kurz, wie folgt, zusammenfassen:

a) Da die Welle der Ausdruck einer oscillierenden Bewegung ist, so kann niemals nur eine einzelne Welle auftreten; jede Welle wird vielmehr von einer Reihe anderer analoger Schwingungen von gleicher Länge und Periode begleitet. Die Höhe jeder nachfolgenden Welle ist kleiner als die der vorhergehenden und wird schließlich gleich Null. Voraussetzung ist dabei, daß die wellenerzeugende Ursache zu wirken aufgehört hat.

b) Beim Vorübergang einer Welle wird das Wasser der Oberfläche vertikal, abwechselnd von oben nach unten und von unten nach oben, sodann aber auch horizontal hin und her bewegt, oder — in der richtigen Folge aufgeführt — erst gesenkt, dann rückwärts, dann aufwärts, dann vorwärts bewegt. Die vertikale Verschiebung jedes einzelnen Wassermoleküls entspricht der Wellenhöhe und ist gleich der doppelten Schwingungsweite oder gleich der Amplitude der Welle.

$$2\,h = 2\,\rho, \quad h = \rho.$$

Die horizontale Verschiebung beträgt ebensoviel.

c) Die komplizierten Gleichungen, durch welche die Bewegung der fortschreitenden Wellen dargestellt wird, können durch Weglassen unwichtiger Glieder bedeutend vereinfacht werden. Die Beziehungen zwischen den wichtigsten Elementen einer Welle, die sich auf der Oberfläche eines stehenden Gewässers bewegt, dessen Tiefe unendlich oder doch genügend groß ist, um jede Wirkung des Grundes auf die Welle auszuschließen, können durch folgende Formeln dargestellt werden:

$$t = \sqrt{\frac{2\pi\lambda}{g}} = 0{,}8\sqrt{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{g t^2}{2\pi} = 1{,}56\, t^2$$

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = 1{,}25\sqrt{\lambda}$$

Die drei Elemente der Welle, Länge, Periode und Geschwindigkeit, sind also voneinander abhängig und variieren gleichzeitig.

Mit Hilfe dieser Formeln kann man die numerischen Werte der Wellen über tiefem Wasser berechnen. Es gehören zu einander folgende Werte:

Periode t	Länge λ	Geschwindigkeit v
0,5 Sek.	0,4 m	0,8 m
1 "	1,6 "	1,6 "
2 "	6,2 "	3,1 "
3 "	14 "	4,7 "
4 "	25 "	6,2 "
5 "	39 "	7,8 "
6 "	56 "	9,4 "
7 "	76 "	10,9 "
8 "	100 "	12,5 "

d) Wellenhöhe und Wellenlänge stehen in keiner bestimmten Beziehung. Im allgemeinen sind jedoch die Wellen um so länger, je höher sie sind. Ein starker Stoß, der die Wasseroberfläche trifft, hat längere und höhere Wellen zur Folge, als ein schwacher. Man schätzt das Verhältnis zwischen der Höhe 2 h und der Länge λ einer Welle auf etwa 1 : 20.

e) Die Dimensionen der Wellen nehmen rasch zu, wenn die erregende Ursache anhaltend wirkt, wie es z. B. beim Wind der Fall ist. Es nehmen alsdann Wellenhöhe und Wellenlänge gleichzeitig zu.

f) Wirkt die erregende Ursache nur kurze Zeit oder hört eine lange wirksam gewesene Ursache zu wirken auf, so nimmt die Wellenhöhe ab. Das Verhältnis zwischen Wellenlänge, Periode und Geschwindigkeit bleibt jedoch bestehen, bis die Wellenbewegung durch die Abnahme der Wellenhöhe allmählich ganz erlischt.

g) Die Wellen sind eine Erscheinung der Oberflächenschichten des Wassers. Die Schwingung (Orbitalbewegung) der Wasserteilchen ist in der Oberflächenschicht am stärksten; sie setzt sich in die darunter liegenden Schichten fort; doch nimmt ihre Schwingungsweite sehr rasch ab.

Mit Rankine kann man diese Abnahme sehr einfach ausdrücken, wenn man die ganze Wassermasse in Schichten zerlegt denkt, deren Mächtigkeit ein Neuntel der Wellenlänge $\left(\frac{\lambda}{9}\right)$ ist. Die Schwingungsweite ρ nimmt dann von oben nach unten so ab, daß sie in jeder Schicht die Hälfte des Betrages ist, den sie in der nächsthöhern Schicht besitzt.

Schicht	Tiefe	Symbol	Wert
Oberfläche	0	ρ	ρ
1	$\frac{1\lambda}{9}$	ρ_1	$\frac{\rho}{2}$
2	$\frac{2\lambda}{9}$	ρ_2	$\frac{\rho}{4}$
3	$\frac{3\lambda}{9}$	ρ_3	$\frac{\rho}{8}$
4	$\frac{4\lambda}{9}$	ρ_4	$\frac{\rho}{16}$
5	$\frac{5\lambda}{9}$	ρ_5	$\frac{\rho}{32}$

Die Schwingungsweite eines Wasserteilchens einer Schicht, welche sich in einer Tiefe gleich der Wellenlänge befindet, ist $^1/_{512}$ derjenigen der Wasserteilchen der Oberflächenschicht. Wenn auch theoretisch die Schwingungen sich bis in die größten Tiefen fortpflanzen, so hören sie doch praktisch schon in geringen Tiefen auf wahrnehmbar zu sein.

h) Wenn eine Welle sich aus tiefem Wasser dem Ufer nähert und dabei in immer flacheres Wasser gelangt, so erleidet sie mehrfache Veränderungen. Die Geschwindigkeit und die Wellenlänge nehmen ab, die Wellenkämme rücken einander immer näher, je seichter das Wasser wird. Die Wellenhöhe nimmt zuerst zu, die Welle bäumt sich auf; der Wellenberg ist nicht mehr auf beiden Seiten gleich ausgebildet, sondern fällt gegen die Küste steiler ab, als seewärts und hängt schließlich, da die oberen Teile den tieferen, durch Reibung am Grund zurückgehaltenen vorauseilen, vorn über, so daß er auf seiner Vorderseite hohl ist. Die Welle stürzt schließ-

lich schäumend vorn über, sie bricht sich. Von diesem Moment an nimmt die Höhe der Welle immer mehr ab, während die Welle auf dem flachen Strand ausläuft. Nur die Periode der Welle bleibt konstant; es ist dies das einzige Element, das durch die abnehmende Tiefe nicht verändert wird. Diese Thatsache ist wichtig. Will man nämlich vom Ufer aus die Dimensionen der Wellen bestimmen, so hat man nur die Periode *t* festzustellen. Dieser Wert ergibt sich leicht aus der Zahl der Wellen, die sich während einer Minute am Strande brechen. Es lassen sich daraus die verschiedenen Elemente der im offenen See über tiefem Wasser laufenden Wellen berechnen, mit einziger Ausnahme der Höhe. Damit die Schätzung ohne merkliche Fehler geschehen kann, muß der Beobachter allerdings ein ziemlich steil abfallendes Ufer wählen. Es kommt nämlich hie und da vor, daß über eine seichte Uferbank wegrollende Wellen einander einholen und miteinander verschmelzen. Die Zählung kann daher an seichten Küsten eine zu kleine Wellenzahl ergeben und damit eine zu lange Periode.

Dadurch, daß die Geschwindigkeit der fortschreitenden Wellen mit der Annäherung an die Küste abnimmt, erhalten die Wellen die Tendenz, sich parallel der Küste zu stellen; so kommt es, daß die Brandung stets nahezu senkrecht an die Küste schlägt.

Wellen treten entweder isoliert oder vergesellschaftet auf. Ein einzelner Stoß, eine plötzliche Erschütterung erzeugt eine isolierte Welle, die sich vom Ort der Störung aus kreisförmig nach allen Richtungen an der Oberfläche fortbewegt. Da die Wasserteilchen auch beim Ausbleiben eines folgenden Stoßes nicht sofort in ihre Ruhelage zurückkehren, sondern weiter schwingen, so folgen der ersten Welle weitere, von gleicher Länge, Periode und Geschwindigkeit; doch nimmt die Wellenhöhe ab und erreicht endlich den Wert Null.

Isolierte Wellen können kreisförmig oder geradlinig sein:

Kreisförmige isolierte Wellen können durch einen festen oder flüssigen Körper hervorgebracht werden,

der im Wasser von oben aufschlägt (Regentropfen, Hagelkörner etc.), oder von unten aufsteigt, wie z. B. Luftblasen, die an der Oberfläche des Wassers platzen.

Geradlinige isolierte Wellen werden durch einen festen an der Wasseroberfläche sich fortbewegenden Körper hervorgerufen. Als Beispiel seien die Wellen erwähnt, die durch ein fahrendes Schiff links und rechts vom Bug aufgeworfen werden.

Den serienweise oder vergesellschaftet auftretenden Wellen liegt eine kontinuierlich und kumulativ wirkende Ursache zu Grunde. Als Beispiel können wir die hinten am Steuerruder im Kielwasser eines in Bewegung begriffenen Dampfers entstehenden Wellen nehmen; dann die Wellen, die durch einen nahe an der Oberfläche schwimmenden Fisch hervorgebracht werden.

Die häufigste und wichtigste Ursache der Entstehung solcher serienweise auftretenden Wellen ist jedoch der Wind. Durch die Reibung der bewegten Luft an der Wasserfläche werden die Wasserteilchen der Oberfläche in schwingende Bewegung versetzt; es entstehen die Windwellen. Diese durch Wind erzeugten Wellen sind von den zahlreichen Wellentypen der Seen weitaus am wichtigsten und am besten bekannt. Wir fassen hier die Resultate der Beobachtungen kurz zusammen:

a) Die Windwellen sind anfänglich ganz klein, nehmen aber, je länger sie auf dem See fortrollen, an Größe zu. Sie empfangen durch die andauernde Einwirkung des Windes fortwährend neue Impulse, die die Orbitalbewegung verstärken. Die an der windgeschützten Küste oft kaum bemerkbaren Wellen erreichen an der gegenüberliegenden windgetroffenen Küste ihre maximale Größe.

Sobald die durch den Wind hervorgerufenen Wellen eine gewisse Größe haben, kompliziert sich ihr Bau durch das Auftreten von sekundären und tertiären Wellen auf ihren Flanken.

b) Wenn der Wind abflaut, dauert der ausgebildete Seegang noch einige Zeit fort. Die Wellen behalten die gleiche Länge, Geschwindigkeit und Periode, ihre Höhe hingegen nimmt allmählich ab. Es sind nicht mehr

vor dem Winde laufende lebende Wellen, es sind tote Wellen; einen solchen Seegang ohne Wind nennt man Dünung (franz. *houle*).

c) Prallen die Wellen an ein senkrecht abfallendes felsiges Ufer oder an eine Mauer, so werden sie teilweise reflektiert und zurückgeworfen. Die zurückgehenden und ankommenden Wellen interferieren, wodurch die Höhe der letzteren beinahe verdoppelt werden kann; es entsteht die sogenannte Wellenkreuzung (franz. *ressac*).

d) Wenn die vom See herkommende Welle an ein steiles felsiges Ufer anschlägt, so wird ihre lebendige Kraft in einen Stoß umgesetzt, der die Uferfelsen mit großer Gewalt trifft. Durch den wiederholten Stoß der Wellen wird das Ufer allmählich untergraben; es bildet sich ein Kliff aus. Vereinzelte Wassergarben und Gischtmassen schießen zu sehr beträchtlichen, diejenigen der Wellen im offenen See weit übersteigenden Höhen empor (Kliffbrandung und Strandbrandung[1]). So überspült die Brandung weithin das Ufer, mag es aus festem Fels oder aus Kies bestehen, bis zu einer Höhe weit über dem mittleren Wasserstand (Strandbildung).

e) Wie bereits erwähnt, setzt sich die Wellenbewegung von der Oberfläche in die darunter liegenden Wasserschichten fort, allerdings unter rascher Abnahme der Amplitude. Die untere Grenze der merkbaren Wellenwirkung fällt mit der unteren Grenze der im Sand des Grundes entstehenden Wellenfurchung (*Ripple marks*) zusammen.

Folgendes Beispiel mag genauern Aufschluß über die untere Grenze der Wellenwirkung geben.

Im Genfer See haben die größten bis jetzt beobachteten Wellen eine Periode (t) von 5 Sekunden, eine Länge (λ) von 20 m und eine Geschwindigkeit (v) von 7,8 m in der Sekunde. Die größte Tiefe, bei der im feinen Sand des Seegrundes die Bildung von Wellenfurchen beobachtet wurde, beträgt etwa 9 m unter dem Niederwasserstand.

f) Die wellenerzeugende Wirkung des Windes kann

[1]) Einzelheiten über Brandung siehe bei Penck, Morphologie II. S. 463—491.

durch eine feine auf der Oberfläche schwimmende Fettschicht aufgehoben werden. Eine Oelschicht von nur 0,000005 bis 0,00001 mm Dicke genügt, um eine Kräuselung der Wasseroberfläche durch den Wind völlig zu verhindern. (Oelflecke, *taches d'huile*, auf dem See).

g) Die Interferenz von Wellen verschiedener Art und Entstehung wirkt im Sinne einer Minderung der Wellenbewegung. Die durch das Auffallen von Regentropfen entstehenden kreisförmigen Wellen vermindern die Höhe der geradlinigen Windwellen sehr rasch. Es ist eine leicht zu beobachtende Thatsache, daß ein durch den Wind stark bewegter See sich bei Regenfall sehr schnell beruhigt[1]).

5. Seiches.

Ein Stoß, der nur auf einen beschränkten Teil der Wasseroberfläche einwirkt, bringt lokale, oberflächliche Oscillationen der Wasserteilchen hervor, die sich weit fortpflanzen. Wir haben diese Oscillationen in den fortschreitenden Wellen der Seen, den Wellen im engern Sinn des Wortes, kennen gelernt. Ein Stoß, der gleichzeitig einen großen Teil der Oberfläche des Sees trifft, bringt eine allgemeine Störung des Gleichgewichtes hervor, die die ganze Wassermasse verschiebt. Sobald die Ursache der Störung zu wirken aufhört, kehrt die Wassermasse durch eine Reihe von Oscillationen, die bis auf den Grund reichen, zur früheren Ruhelage zurück. Solche Schwankungen, an denen die ganze Wassermasse teilnimmt, werden im Gegensatz zu den fortschreitenden Wellen, stehende Wellen genannt. Wie schon früher erwähnt, bezeichnen wir solche stehende Wellen im See kurzweg als Seiches.

Wenn man in einem kleinen Trog oder in einer Schüssel Seiches auf experimentelle Weise hervorrufen will, so kann man den das Gleichgewicht störenden Stoß entweder dem Gefäß, das das Wasser enthält, oder direkt der Flüssigkeit erteilen. In beiden Fällen fängt die ganze

1) Daher das Sprichwort: *„petite pluie abat grand vent"*.

Wassermasse an zu schaukeln und vollführt rechts und links von einer senkrechten Ebene, in der sich der Schwingungsknoten *(N)* befindet, eine Reihe von pendelartigen horizontalen Schwingungen.

Wäre das Gefäß unendlich groß, so würde sich die horizontale Pendelbewegung allein geltend machen. Da aber die Flüssigkeit durch die Wände des Beckens begrenzt wird, so häuft sie sich an der einen Seite an, wodurch hier der Wasserstand steigt, und nimmt an der anderen Seite ab, wodurch hier ein Sinken des Wasserstandes eintritt. Wir sehen daher die sekundäre Erscheinung, daß das Wasser an einem Ende des Gefäßes von *A* auf *A'* sinkt und an dem anderen von *B* auf *B'* steigt, und daß gleich darauf die umgekehrte Bewegung eintritt (Fig. 4).

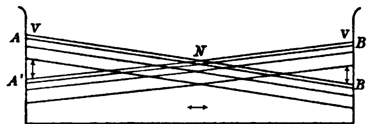


Fig. 4. Uninodale stehende Welle.

An den beiden Enden des Gefäßes sind die Schwankungen des Wassers am größten. Hier liegen die Bäuche *(V)* der stehenden Welle. An der Stelle der Bäuche steigt das Wasser ohne horizontale Verschiebung senkrecht auf und nieder; an den Knoten hingegen verschiebt sich das Wasser horizontal hin und her, bleibt aber konstant auf dem gleichen Niveau. In der Praxis läßt sich die horizontale Verschiebung des Wassers in den Knoten schwer nachweisen. In den Bäuchen hingegen sind die periodischen Niveauschwankungen des Wassers deutlich wahrnehmbar. Nur diese letztere, an sich sekundäre Erscheinung läßt sich daher praktisch für das Studium der Seiches verwenden.

Wie bei pendelartigen Schwingungen, so ist auch bei stehenden Wellen die Schwingungsweite (Höhe) bei der ersten Welle am größten und nimmt bei den nachfolgenden Wellen ab, bis sie gleich Null wird.

Der Fall, wie wir ihn eben geschildert, ist der einfachste; er zeigt uns typisch eine uninodale stehende Welle, d. h. eine stehende Welle mit einem Knoten. Der Knoten halbiert die Wassermasse ungefähr; rechts und links liegen die Bäuche. Die Schwingungen können aber viel komplizierter sein. Unter gewissen Bedingungen kann ein Stoß die Wassermasse derart zum Schwingen bringen, daß jede Hälfte für sich uninodal schwingt; die ganze Wassermasse schwingt dann in einer binodalen stehenden Welle. Die Wasseroberfläche zeigt unveränderte Niveaupunkte, d. h. Knoten, bei N' und N', einen vollständigen Bauch BB' in der Mitte und zwei halbe Bäuche AA' und CC' an den Enden (Fig. 5). Uninodale und binodale stehende Wellen können gleichzeitig im Versuchsgefäß hervorgerufen werden und nebeneinander schwingen.

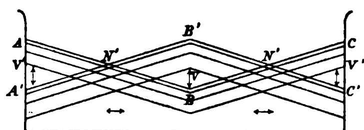


Fig. 5. Binodale stehende Welle.

Die Interferenz beider Schwingungen läßt sehr komplizierte und von Ort zu Ort verschiedene Bewegungen resultieren. Naturgemäß könnte man sich auch tri-, quatri- und plurinodale stehende Wellen denken. Doch sind bis jetzt solche Wellen in Seen noch nicht sicher nachgewiesen worden.

Stehende Wellen können künstlich nach der Richtung der beiden horizontalen Hauptachsen eines Gefäßes hervorgerufen werden. Sind die beiden Achsen ungleich lang, so unterscheidet man longitudinale und transversale Schwingungen. Beide Schwingungen können im Gefäß nebeneinander bestehen. Je nach der Koexistenz uninodaler oder binodaler Welle entstehen mehr oder weniger verwickelte Interferenzerscheinungen. Es ist sogar anzunehmen, daß das Wasser gleichzeitig nach mehr als zwei Richtungen in stehenden Wellen schwingen

kann. Bei dem gegenwärtigen Stand der Seenforschung ist jedoch diese Frage belanglos.

Stehende Wellen habe ich experimentell auf zwei Arten hervorgerufen:

a) Durch Einwirkung auf das Gefäß. Man hebt ein Ende des Gefäßes empor und läßt es plötzlich wieder fallen. Die so entstandene Schwingung des Wassers ist uninodal.

b) Durch Einwirkung auf das Wasser. Man taucht einen größeren festen Körper in die Flüssigkeit und bewegt ihn rhythmisch auf und ab, so daß die Zeitintervalle der stehenden Periode der Welle entsprechen. Die Stelle, an der der Körper eintaucht, wird zum Bauch der stehenden Welle. Taucht man den Körper (mit passendem Rhythmus) an einem Ende des Gefäßes ein, so wird die Schwingung uninodal. Binodal dagegen wird sie, wenn der Körper in der Mitte des Gefäßes das Wasser berührt.

Hat das Gefäß einen horizontalen Boden, so ist die Periode der stehenden Welle proportional der Länge der Achse, nach welcher die Schwingung stattfindet, und umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Tiefe des Wassers:

$$t = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{l}{\sqrt{h}} = \frac{l}{\sqrt{gh}}$$

wo t gleich der halben Schwingungsdauer, d. h. gleich der Zeit vom Hochstand an einem Ende des Gefäßes bis zum Tiefstand am selben Ende ist; die Schwingungsdauer, d. h. die Zeit, die verstreicht von dem Moment, in dem der Wasserspiegel eine bestimmte Stellung hat, bis zum nächsten Moment, in dem er dieselbe Stellung wieder erreicht, ist also $2t$. l ist die Länge der Achse des betreffenden Gefäßes in Metern; h die Tiefe des Wassers in Metern; g die Beschleunigung der Schwere $= 9{,}809$.

Theoretisch sollte eigentlich die binodale Schwingung eine halb so große Periode aufweisen, wie die uninodale. Meine experimentellen Untersuchungen im Laboratorium haben jedoch immer ein etwas abweichendes Verhältnis

ergeben. Die Theorie wäre also in diesem Punkte noch zu ergänzen.

Wenn das Gefäß schief gestellt wird, so daß das Wasser auf der einen Seite tiefer steht als auf der anderen, so wird die Schwingungsdauer etwas verlängert und der Bauch auf der seichten Seite höher; der Knoten verschiebt sich gleichzeitig etwas gegen die seichte Seite.

Soweit die haupsächlichsten experimentell erhaltenen Eigenschaften der stehenden Wellen, die für das Studium der Seiches von Wichtigkeit sind.

Stehende Wellen, die wir in einem Glase, in einer Badewanne erzeugen und beobachten können, finden sich auch in Weihern, in kleinen und großen Seen. Der größte See, in dem die Seiches bis jetzt eingehend studiert worden sind, ist der Genfer See, mit 72 km Länge und einem Volumen von 89 Milliarden Kubikmetern[1]). Ich habe an diesem See konstatieren können, daß die Seiches sämtliche Eigenschaften der stehenden Wellen besitzen, daß sie eine pendelartige Schwingung sind, an der die ganze Wassermasse des Sees bis auf den tiefsten Grund hinab teilnimmt.

Die Seiches des Genfer Sees, wie jedes Sees überhaupt, sind periodische (rhythmische) Denivellationen des Wassers, das an gewissen Stellen abwechselnd steigt und fällt, ohne daß dabei die Wasseroberfläche in einem dem Auge direkt merkbaren Grade deformiert würde.

Ein gutes Bild dieser Schwingungen des Wasserspiegels ergibt sich aus den Werten für die Periode der Seiches. Im folgenden führe ich diese Werte für Seen an, für die genügende Beobachtungen vorliegen. Ich benutze dabei zur Charakterisierung der verschiedenen Typen der Seiches in den einzelnen Seen die nach den oben beschriebenen Experimenten aufgestellte Nomenklatur. Die in Minuten ausgedrückte Periode 2t ent-

---

[1]) Seiches sind auch im Plattensee (77,2 km Länge) konstatiert worden. Die uninodalen Seiches haben eine Periode von 10—12 Stunden. Die sehr geringe Tiefe des Sees ($3\frac{1}{2}$ m im Mittel, 11 m im Maximum) bewirkt ein so langsames Schwingen der Wassermassen und ein so rasches Herabsinken der Amplitude, daß die Beobachtung sehr schwierig wird. Vergl. Eugen v. Cholnoky, Wissensch. Erforschung des Plattensees I. III. Limnologie. Wien 1897.

spricht einer ganzen Schwingung, während deren das Wasser an einem bestimmten Punkte vom Maximum zum Minimum sinkt und wieder zum Maximum steigt.

Ich habe in den verschiedenen untersuchten Seen folgende Seiches beobachten können:

1. longitudinale Seiches, die in der Richtung der Längsachse des länglich gestreckten Sees schwingen;

2. transversale Seiches, die in der Richtung der kleinen oder einer der kleinen Achsen des Sees schwingen.

In beiden Fällen unterscheidet man:

a) uninodale Seiches;

b) binodale Seiches;

c) dichrotische Seiches[1]), d. h. Seiches die durch Interferenz aus uninodalen und binodalen Seiches entstehen;

d) plurinodale Seiches.

	Länge der Axe	Maximale Breite	Maximale Tiefe	Mittlere Tiefe	Vol.	Periode der Seiches longitud. uni-nod.	Periode der Seiches longitud. bi-nod.	Periode der Seiches transv. uni-nod.
	km	km	m	m	km³	Minuten		
Genfer See .	72	13,8	310	153	89	73	35,5	10
Bodensee . .	65		252	90	48	55,8	28,1	
Züricher See .	29		143	44	4	45,6	23,8	
NeuenburgerS.	38		153	64	14	50	25	
L. Georges[2]) .	29			5		131	72	
Plattensee . .	77			3		600—700		

Eine unregelmäßige Gestalt des Seebeckens bedingt durchaus keine Unregelmäßigkeit in den Bewegungen der Seiches. Der Genfer See z. B. hat die Gestalt eines asymmetrischen Halbmondes; am Südwestende beim Uebergang vom großen in den kleinen See ist er stark eingeengt, der kleine See ist weniger tief; trotzdem stellen sich die Seiches des Genfer Sees als sehr regelmäßige Schwingungen dar, die sich in langen Serien folgen. In kompliziert gebauten Seen, wie z. B. im Vierwaldstättersee, der in verschiedene scharf abgegrenzte Becken zerfällt, können in jedem Becken individuell ent-

1) d. h. Seiches mit zwei Schlägen, weil auf den Kurven des Limnographen Doppelgipfel erscheinen, die den dichrotischen Kurven der Ausschläge bei gewissen Herzkrankheiten ähnlich sehen.

2) Lake Georges in Australien.

wickelte Seiches auftreten. Doch hat man auch an diesem See uninodale und binodale den ganzen See gleichzeitig umfassende Seiches beobachtet.

Die Unregelmäßigkeiten des Seebeckens machen sich jedoch auf andere Weise bemerkbar. Wenn die Sohle des Beckens nicht horizontal und eben ist, so ist die allgemeine Formel (S. 75)

$$t = \frac{1}{\sqrt{g}} \left(\frac{l}{\sqrt{h}} \right)$$

welche die Periode der Seiches als Funktion der Tiefe des Sees angiebt, nicht mehr anwendbar, sondern muß modifiziert werden.

Paul du Boys hat dieses Problem gelöst, indem er die schaukelnde Bewegung der Seiches mit der Bewegung einer fortschreitenden Welle indentifizierte, deren Länge das Doppelte der Länge des Seebeckens betrug, und die er sich in dem betreffenden Seebecken eingeschlossen vorstellte. Die Welle wird an dem extremen Punkte der Wanne reflektiert, kehrt zurück und interferiert mit der nächstnachfolgenden fortschreitenden Welle zu einer stehenden Welle.

Um die Schwingungsdauer t der Seiches für ein beliebiges Seebecken zu berechnen, zerlegt man das gesamte Becken (bezw. dessen Längsprofil) entlang der Achse des Sees in eine Anzahl (m) Teilstücke, deren jedes für sich als Becken mit ebenem Boden betrachtet werden kann, indem man in die Formel für die Seiches (S. 75) statt der Wurzel aus der Tiefe ($\sqrt{h}$) das arithmetische Mittel der Wurzel aus der Tiefe des Anfanges ($\sqrt{h_{n-1}}$) und der Wurzel aus der Tiefe des Endes ($\sqrt{h_n}$) des betreffenden Teilstückes setzt. Hierauf berechnet man die Zeit, die die Welle braucht, um die einzelnen Stücke (l_n) des Längsprofils zu durchlaufen, deren Tiefe an beiden Enden (h_{n-1} und h_n) gemessen ist. Die Summe dieser Zeiten gibt dann den gesuchten Wert t.

$$t = \frac{1}{\sqrt{g}} \sum_{n=1}^{n=m} \frac{l_n}{\frac{1}{2}(\sqrt{h_{n-1}} + \sqrt{h_n})}$$

Da in Seen, die eine unregelmäßige, unebene Sohle besitzen, an seichten Stellen die Bewegung der Seiches verlangsamt wird, so befinden sich die Knoten nicht genau an den Stellen, wo sie nach der Theorie sein sollten, d. h. bei uninodalen Seiches in der Mitte der Längsachse, bei binodalen im Abstand gleich $^1/_4$ der Länge von den beiden Enden. Sie sind vielmehr etwas gegen dasjenige Ende des Sees verschoben, in welchem die Tiefe geringer ist.

Als Ausdruck einer pendelartigen Schwingung erscheinen die Seiches nie einzeln, sondern immer in Serien. Die erste stehende Welle ist die größte, sie ergibt den größten Ausschlag nach oben wie nach unten; die folgenden werden immer kleiner und kleiner, bis schließlich die Amplitude gleich Null wird. Die längste bekannte Serie von Seiches wurde im Genfer See beobachtet; sie begann am 26. März 1891. In $7^1/_2$ Tagen fanden 147 Schwingungen von einer Periode von 73 Minuten statt. Die Höhe der Schwingungen ging von 20 cm auf 7 cm herab. Wenn diese Serie nicht durch eine andere Reihe von anders gearteten Seiches unterbrochen worden wäre, so hätte sie, wie sich aus den Amplituden durch Extrapolation berechnen läßt, $9^1/_2$ Tage angedauert und würde, bevor die Amplitude gleich Null geworden wäre, 182 Schwingungen gezählt haben.

Die Seiches entstehen in den Seen als Folge von atmosphärischen Vorgängen, die eine Störung des Gleichgewichts des Sees veranlassen. In Zeiten von plötzlichen sprungweisen Aenderungen des Barometerstandes, bei Sturm, bei Gewittern und bei Böen erscheinen die Seiches ganz plötzlich und oft mit großen Amplituden. Bei unruhigem Wetter sind sie stärker als bei ruhigem. Aber auch bei ganz ruhigem Wetter dauern die Seiches im See noch an; sie fehlen nur selten ganz, um nicht zu sagen nie. Mit genügend empfindlichen Instrumenten wie Limnographen oder Plemyrametern wird man wohl stets stehende Wellen im See erkennen können.

Die Höhe der Seiches ist naturgemäß von einem Punkt des Ufers zum anderen verschieden. Innerhalb der

senkrecht zur Schwingungsachse durch den Knoten gezogenen Linie ist sie gleich Null. Die Bewegung gibt sich hier durch eine kaum merkbare horizontale Verschiebung kund. Im Centrum der Bäuche ist die vertikale Bewegung am größten.

Auch die lokalen Verhältnisse des Beobachtungsortes sind für die Höhe der Seiches maßgebend. Am Ende einer engen, wenig tiefen Bucht ist *ceteris paribus* die Amplitude weit beträchtlicher als an Orten, wo der Seeboden steil zu großen Tiefen abfällt.

Die größten bekannten Seiches sind in Genf am 3. Oktober 1841 von Veinié beobachtet worden. Sie erreichten eine Höhe von über 1,87 m (Differenz zwischen Hochstand und Tiefstand). Seitdem selbständig registrierende Apparate eingerichtet worden sind, war die größte gemessene Höhe diejenige der Seiches vom 20. August 1890, deren Amplitude 63 cm betrug.

Berücksichtigt man, daß die Höhe des Seiches bei Genf durch lokale Verhältnisse übermäßig gesteigert wird, so findet man, daß die Seiches vom 3. Oktober 1841, die eine Amplitude von fast 2 m erreichten, durch eine lokale Luftdruckänderung von 6 mm in einer halben Stunde verursacht worden sein konnten[1]).

Vergeblich habe ich nach einem Zusammenhang zwischen Erdbeben und Seiches gesucht. Die seismischen Stoßwellen haben eine viel zu kurze Dauer von nur einigen Sekunden, als daß sie als Ursache der langsamen Schwingungen der Seiches gelten könnten, deren kürzeste in unseren großen Seen immer noch eine Periode von mehreren Minuten haben. Ein Erdbeben kann höchstens in einem kleinen Teich stehende Wellen hervorrufen.

Vibrationen des Sees.

Außer den Seiches, deren Bewegungserscheinungen wir auf uni- oder binodale stehende Wellen zurückführen, sind auf dem Wasser der Seen auch andere, rasch ver-

---

[1]) cf. F. A. Forel, Les Seiches et les variations locales de la pression atmosphérique. Archives des Sc. phys. et nat. IX. 89. Genève 1897.

laufende Schwingungen von einer halben bis zu einer Minute Dauer zu beobachten. Wir bezeichnen sie vorläufig mit dem allgemeinen Namen der Vibrationen. Wahrscheinlich handelt es sich um plurinodale Schwingungen. Sie scheinen sich auf zweierlei Ursachen zurückzuführen, einerseits auf Erschütterungen der Wassermasse, wie sie durch das Vorbeifahren eines Dampfers erzeugt werden, andererseits auf die Einwirkung des Windes [1]).

6. Strömungen.

Unter dem Einfluß verschiedener Ursachen können die Wassermassen eines Sees eine fortschreitende Bewegung annehmen, es bilden sich Strömungen. Ihrer Entstehung nach lassen sich Strömungen verschiedener Art unterscheiden.

a) Abflußströmung.

Jeder Flußsee kann als erweiterter Fluß betrachtet werden. Von der Einmündung der Zuflüsse fließt das Wasser dem Abfluß zu. Diese Strömung ist nur an den Ein- und Ausmündungsstellen bemerkbar und verliert sich im übrigen in der großen Wassermasse. Nur in einem kleinen, von einem Fluß durchströmten See oder an eingeengten schmalen Stellen eines Sees kann sie deutlich werden [2]).

b) Durch dynamische Ursachen hervorgerufene Strömungen

gibt es zweierlei, nämlich die durch den Wind erzeugten und die durch die Seiches hervorgebrachten Strömungen.

Windströmungen. Indem die im Winde bewegte Luft sich an der Oberfläche des Wassers reibt, reißt sie die obersten Wasserteilchen mit sich fort; es entsteht eine in der Richtung des Windes sich bewegende Strö-

[1]) Weitere Einzelheiten über Seiches und Vibrationen siehe in meiner Monographie des Genfer Sees: Le Léman, T. II. p. 39—231. Lausanne 1895.
[2]) Vergl. oben S. 61.

mung. Diese Strömung ist oberflächlich; die Bewegung dringt nur sehr langsam in tiefere Schichten vor. Infolge dieser Strömung häuft sich Wasser an dem Ufer an, nach dem der Wind bläst, d. h. Windstau tritt hier ein. Dadurch wird ein Gegenstrom in der Tiefe erzeugt. Das Wasser sinkt an den Gehängen des Seebeckens entlang zur Tiefe, bewegt sich als horizontaler Strom in den mittleren oder tiefen Schichten des Sees nach der gegenüber liegenden Küste zurück und steigt hier den Gehängen entlang wieder empor, um sich mit dem primären, in entgegengesetzter Richtung fließenden Oberstrom zu vereinigen. Wenn der Wind andauernd weht, so kann die ganze Wassermasse des Sees aufgerührt und in eine geschlossene Zirkulation einbezogen werden (Fig. 6).

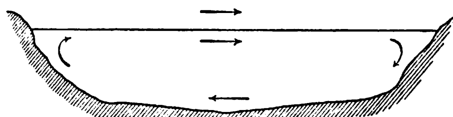


Fig. 6. Durch Wind hervorgerufene Zirkulation.

Der Gegenstrom findet sich in verschiedenen Tiefen, je nachdem das Seewasser thermisch geschichtet ist oder nicht. Er fließt zwischen den leichten Schichten der Oberfläche und den schwereren Schichten der mittleren oder tiefen Region. Doch auch die untern Schichten können schließlich teilweise vom Strom mitgerissen werden und so die verschieden warmen Wassermassen sich mischen. Die Temperaturbeobachtungen lassen nicht selten deutlich eine solche Mischung erkennen.

Seichesströmungen. Die schaukelnde, im vorhergehenden Kapitel behandelte Bewegung des Wassers in den Seiches ist unter anderem durch eine horizontale Oscillation des Wassers, ein Zu- und Abfließen desselben, charakterisiert, die in der Knotenlinie am größten ist. Es treten alternierende Strömungen und Gegenströmungen auf. Diese Strömungen sind jedoch, wie die Rechnung zeigt, nur schwach, es sei denn, daß sie durch eine

lokale Einengung des Sees gesteigert werden; nur in Seeengen darf man erwarten, sie zu beobachten. Sie haben sich daher bis jetzt der Beobachtung entzogen, mit einziger Ausnahme der klassischen, seit alter Zeit bekannten Strömungen des Euripos bei Chalkis, wenn wir überhaupt diesen, einen Meeresteil und nicht einen See betreffenden Fall hier anführen dürfen[1]).

Thermische Strömungen. Bei lokaler Erwärmung oder Abkühlung der neben- oder übereinander lagernden Wassermassen entstehen Dichteunterschiede, die zu Strömungen im See Anlaß geben.

Wenn durch lokale Erwärmung die Temperatur der obersten Wasserschichten einer Region höher geworden ist, als diejenige einer anderen benachbarten, so entsteht eine Gleichgewichtsstörung, die nur durch eine horizontale Strömung ausgeglichen werden kann.

Wenn eine Temperaturänderung — Erwärmung oder Abkühlung — die Dichte von übereinanderlagernden Schichten ändert, können vertikale Strömungen entstehen. Mögen die Oberflächenschichten infolge einer Temperaturänderung schwerer geworden sein, als die tiefer liegenden, oder die tiefen Schichten leichter als diejenigen der Oberfläche, in beiden Fällen ist das Gleichgewicht gestört; die anomal geschichteten Wassermassen müssen sich umlagern. Es bilden sich infolgedessen auf- und absteigende Strömungen, die andauern, bis die Wassermassen wieder eine ihrer Dichte entsprechende Gleichgewichtslage angenommen haben. Solche Strömungen treten besonders während der Jahreszeiten auf, in denen die thermische Schichtung des Seewassers vernichtet wird und der See den Zustand thermischer Uniformität annimmt. Trotzdem entziehen sie sich der direkten Beobachtung. Wir schließen nur auf ihre Existenz aus anderen Thatsachen. Noch weniger sind wir über ihr Auftreten in den Tiefen unterrichtet; doch dürften sie unter bestimmten Verhältnissen auch dort vorkommen.

---

[1]) Vergl. F. A. Forel, C. R. Acad. Sc. Paris LXXXIX. (1879) 859, sowie Krümmel, Zum Problem des Euripus. Peterm. Mitteil. 1888. S. 331.

c) Strömungen aus hydrostatischen Ursachen.

Unter diesem Namen fasse ich diejenigen Strömungen zusammen, die durch einen Unterschied des spezifischen Gewichtes zwischen zwei benachbarten Wassermassen bewirkt werden. Dieser Unterschied kann dabei von gelösten oder mechanisch suspendierten Körpern herrühren.

Zahlreich sind die Fälle, in denen wir im Wasser solche Unterschiede auftreten sehen; bald ist eine bestimmte Wassermasse leichter als das umgebende Wasser, bald ist sie schwerer. Sie treten z. B. auf, wenn ein Zufluß stark salziges Wasser in einen Süßwassersee ergießt, wenn eine unterseeische Süßwasserquelle am Boden eines Salzsees auftritt, wenn das Wasser eines Zuflusses stark mit suspendierten Schlammmassen beladen ist, die sein spezifisches Gewicht vergrößern, wenn das Wasser am Ufer des Sees durch heftigen Wellenschlag aufgerührten Schlamm enthält, wenn das schlammreiche Wasser in den größten Tiefen des Sees einen Teil seines Schlammes durch Niederschlagen verliert u. s. w.

Werden diese Unterschiede im spezifischen Gewicht nicht durch Temperaturdifferenzen, die im entgegengesetzten Sinn wirken, ausgeglichen, so befinden sich die betreffenden Wassermassen wegen ihrer anomalen Dichte in labilem Gleichgewicht: auf- und absteigende Strömungen sind die Folge. Die interessantesten und bestbekannten Strömungen dieser Art sind diejenigen, die sich an der Mündung eines mit Schwebestoffen beladenen Zuflusses einstellen. Das trübe schwere Wasser des Zuflusses gleitet, der Linie des stärksten Gefälles folgend, über das Gehänge des untergetauchten Deltas in die Tiefe und sinkt bis auf den Grund des Sees. Das Studium der thermischen Verhältnisse der Seen hat gezeigt, daß äußerst geringe, nur die vierte oder fünfte Dezimale betreffende Dichteunterschiede schon Convektions- d. i. Ausgleichsströmungen hervorbringen können. Eine gleich geringe Differenz muß auch zu hydrostatischen Strömungen führen.

Im Vergleich mit den Strömungen des Ozeans sind

die Strömungen der Seen, ob sie nun dynamischen, thermischen oder hydrostatischen Ursprungs sind, schwach. In den meisten Fällen sind sie unregelmäßig und lassen sich nur schwer allgemein beschreiben.

III. Kapitel.

Chemie der Seen, chemische Zusammensetzung des Seewassers.

Von lokalen, später zu behandelnden Abweichungen abgesehen, hängt die chemische Zusammensetzung des Seewassers von folgenden drei Faktoren ab:

Von der Zusammensetzung des Wassers der Zuflüsse und seiner jahreszeitlichen Verteilung;

von den Veränderungen, die das Wasser während seines Aufenthalts im See erleidet;

von der Wasserabfuhr.

1. Zusammensetzung des zugeführten Wassers.

a) Regen. Das an der Oberfläche des Sees sich kondensierende Wasser kann als chemisch rein angesehen werden. Das auf den See fallende Regenwasser ist destilliertes Wasser; es kann jedoch bei seinem Durchgang durch die Atmosphäre deren Gase, also Sauerstoff, Stickstoff, Argon, Kohlensäure, salpeterige Säure, Salpetersäure, Ammoniak etc. absorbiert haben. Hagel und Schnee sind festes, chemisch reines Wasser, doch auch mit Gehalt an atmosphärischen Gasen. Wenn diese Niederschläge allein den See speisen würden, so würde der letztere leicht säuerliches, durchlüftetes, schwach mit Ammoniaksalzen beladenes Süßwasser enthalten.

b) Flüsse. Für die Mehrzahl der Seen sind die Flüsse die hauptsächlichste Wasserquelle. Das Flußwasser stammt vom Regenwasser, das längere oder kürzere Zeit im Schoß der Erdrinde oder an deren Oberfläche verweilt hat. Auf seinem Laufe sättigt sich das Flußwasser nicht nur mit atmosphärischen Gasen, son-

dern löst auch Salze und organische Substanzen. Je nach der petrographischen Zusammensetzung des Nährbeckens enthält es Calcium- und Magnesiumkarbonate, Calcium- und Magnesiumsulfate und ferner Karbonate und Sulfate der Alkalimetalle, Chlornatrium, Kieselsäure etc.[1]).

Diese Salze kommen in größeren und geringeren Mengen im Flußwasser vor, je nach den Kontaktbedingungen zwischen dem Gestein und dem abfließenden Wasser. Alle Sättigungsgrade vom reinsten Wasser bis zur gesättigten Lösung sind beobachtet. Stark salzhaltiges Wasser enthält bis zu 20 und 30 g Salze im Liter, d. i. soviel und mehr als das Wasser des Ozeans.

Von den im Wasser gelösten organischen Verbindungen sind vor allem zu nennen Humussäure und Ulminsäure, aus Torf und den vegetabilischen Erden stammend, salpeterige Säure und Salpetersäure, Ammoniakverbindungen etc.

Wäre der Salzgehalt der Zuflüsse der einzige in Betracht kommende Faktor, der den Salzgehalt des Sees regelt, so würde der letztere dem mittleren Salzgehalt der Zuflüsse (berechnet unter Berücksichtigung der verschiedenen Wasserführung der einzelnen Zuflüsse) entsprechen.

2. Veränderungen, die das Wasser während seines Aufenthaltes im See erleidet.

a) Verdünnungen des Wassers durch den Regen. Das direkt aus der Atmosphäre fallende Wasser ist reiner als das Seewasser. Seine Beimengung zum Seewasser bewirkt daher eine Verdünnung des Salzgehaltes, eine Verringerung der Konzentration des Seewassers.

---

1) Für Wasser von gewöhnlicher Temperatur ergeben sich folgende maximale Löslichkeitsverhältnisse:

Gips	2000	mg per Liter
Gallertartige Kieselsäure	130	„ „ „
Kohlensaurer Kalk	20	„ „ „
Aluminiumsilicat	5	„ „ „

In säuerlichem Wasser ist die Löslichkeit größer.

b) Chemische Niederschläge setzen sich nur ab, wenn das Wasser mit Salzen gesättigt oder übersättigt ist. Die Ausscheidung wird durch verschiedene Faktoren begünstigt. Die Temperaturschwankungen beeinflussen die Löslichkeit der verschiedenen Salze in positivem oder negativem Sinne. Die abwechselnde Erwärmung und Abkühlung des Seewassers spielt daher bei der Bildung der chemischen Niederschläge eine wichtige Rolle.

Von bedeutendem Einfluß ist ferner die Anwesenheit bestimmter, im Wasser gelöster Körper. Es trifft dies ganz besonders für die Kohlensäure zu. Wenn die letztere reduziert wird, was z. B. durch die Funktion des Chlorophylls der Wasserpflanzen eintritt, so werden die als Bikarbonate im Wasser vorhandenen gelösten Salze des Calciums, Magnesiums und des Eisens niedergeschlagen, weil die Karbonate weniger löslich sind als die Bikarbonate [1]).

c) Veränderungen durch biologische Vorgänge. Unter dem Einfluß des Lichtes reduzieren die Wasserpflanzen vermittelst ihres Chlorophylls die im Wasser gelöste Kohlensäure und geben freien Sauerstoff an ihre Umgebung ab. Zugleich schlagen die Assimilations- und Ernährungsfunktionen der Pflanzen die gelösten organischen Substanzen (CO_2, NO_3R, NO_2R) nieder. Die Tiere hingegen absorbieren den Sauerstoff und geben hauptsächlich Kohlensäure und Ammoniaksalze ab. Tiere und Pflanzen sondern in ihrem Skelett Kieselsäure, ferner Alkali- und Erdmetalle als Karbonate, Phosphate, Oxalate etc. ab. In manchen Fällen wird diese Aufspeicherung von Mineralstoffen so bedeutend, daß sie nach dem Ableben der betreffenden Organismen zur Bildung organogener Sedimente auf dem Grund des Sees, besonders in der Uferzone, Anlaß gibt. Allerdings bilden sich diese Ab-

[1]) Bei einem Druck von 760 mm und einer entsprechenden normalen Spannung der Kohlensäure in der Luft löst reines Wasser folgende Quantitäten von Calciumkarbonat (nach A. Delebecque, Lacs français S. 218).

Temperatur	Bikarbonat	Karbonat
bei 4°	62 mg im Liter	11 mg im Liter
bei 25°	42 „ „ „	14 „ „ „

lagerungen so langsam, daß man kaum sagen kann, ob sie wirklich auf die Zusammensetzung des Seewassers von Einfluß sind.

d) Chemische Auflösung. Kommen Gesteine, die aus löslichen Salzen bestehen, in direkte Berührung mit dem Seewasser, so können sie vom Seewasser zum Teil gelöst werden und so zum Salzgehalt des Seewassers beitragen, z. B. Steinsalz, Gips, erdige Karbonate, Kieselsäure etc.

3. Einfluß der Wasserabfuhr.

Die beiden die Wasserabfuhr aus dem See besorgenden Faktoren wirken verschieden und beinahe in entgegengesetztem Sinne auf die chemische Zusammensetzung des Seewassers.

a) Die Verdunstung entführt aus dem See außer Gasen nur reines Wasser. Da sie in Endseen der einzige Faktor ist, der das durch die Zuflüsse zugeführte Wasser wegführt, so bewirkt sie hier eine Anreicherung des Seewassers mit Salzen. Die Mineralsalze können sich nicht mit den Wasserdämpfen verflüchtigen. Sie bleiben zurück, die Lösung konzentriert sich immer mehr, bis sie schließlich gesättigt und übersättigt wird. In Seen, die in der trockenen Jahreszeit vollständig austrocknen, schlagen sich die gelösten Salze nieder und bilden schließlich auf dem Boden der Wanne eine Salzkruste. Wenn in der Regenzeit die Wanne sich wieder mit Wasser füllt, so lösen sich diese Salzmassen wieder auf. Endseen sind daher Salzseen. Die Zusammensetzung ihres Wassers ist von See zu See verschieden, da sie von dem spezifischen Salzgehalt des Wassers der betreffenden Zuflüsse des Sees abhängig ist. Ein permanenter Endsee kann im Laufe der Zeiten vollständig gesättigt werden; dieser Moment tritt für verschiedene Salze zu verschiedenen Zeiten ein und zwar um so früher, je weniger löslich das betreffende Salz ist, und in je größerer Masse es durch die Zuflüsse herbeigebracht wird. Wenn die Sättigung eingetreten ist, so wird Salz

ausgefällt; es schlägt sich auf der Sohle des Beckens nieder. Auf diese Weise entstanden auf dem Grunde alter Seen in der geologischen Vergangenheit manche geschichtete chemische Niederschläge und Ablagerungen, die uns heute als Glieder geologischer Formationen entgegentreten.

b) Existiert ein ober- oder unterirdischer Abfluß, der die Wasserabfuhr aus dem See besorgt, so entführt er Seewasser von der Zusammensetzung, in der es im See vorhanden ist. Die chemische Zusammensetzung des Seewassers wird daher durch den Abfluß nicht verändert. Ein See mit ständigem Abfluß weist einen Salzgehalt auf, der dem mittleren Salzgehalt aller Zuflüsse entspricht, wenn wir von geringen, durch die oben angeführten Ursachen und durch die Verdunstung bedingten Aenderungen absehen.

Wenn in einem See mit temporärem Abfluß dieser Abfluß lange Zeit trocken liegt und nicht funktioniert, so kann die Verdunstung so bedeutend werden, daß das Wasser des Sees konzentriert wird und sein Salzgehalt denjenigen der Zuflüsse ganz beträchtlich übersteigt. Wenn später der Abfluß wieder in Thätigkeit tritt, so führt er das durch die Wassermenge der Zuflüsse verdrängte konzentrierte Wasser des Sees weg; der Salzgehalt des Sees wird dadurch allmählich wieder normal.

Es folgt aus obigen Ausführungen, daß Endseen meist salzig sind. Flußseen mit permanentem Abfluß führen meistens süßes Wasser, Flußseen mit temporärem Abfluß dagegen meistens Brackwasser, dessen Sättigungsgrad von der Dauer des Funktionierens des Abflusses abhängt.

Das Wasser der Seen, die einen permanenten Abfluß besitzen, hat daher eine verhältnismäßig beständige Zusammensetzung. Die Zusammensetzung bleibt um so gleichmäßiger, je größer das Volumen des Sees im Verhältnis zu demjenigen der Zuflüsse ist.

Endseen und Flußseen mit intermittierendem Abfluß haben dagegen einen wechselnden Salzgehalt. Je nie-

driger der Wasserstand des Sees, desto konzentrierter die Lösung. Je höher der Wasserstand in einem Endsee ist, oder je länger der Abfluß eines temporären Flusses gedauert hat, desto geringer ist der Salzgehalt.

Es ergibt sich daraus, daß jeder See seine spezifische Salinität besitzt und daß der Salzgehalt und die Schwankungen desselben zu den hervorstechendsten Eigenheiten eines Sees gehören.

4. Das Seewasser.

Die chemische Zusammensetzung des Seewassers schwankt relativ wenig. Sie ändert sich immerhin in zweifachem Sinn: sie zeigt eine meist sehr schwache jährliche Periode und außerdem lokale Schwankungen von Ort zu Ort, die mitunter beträchtlich sind.

A. Jährliche Schwankungen der chemischen Zusammensetzung. Der Salzgehalt der Zuflüsse eines Sees hängt von ihrer gegenwärtigen Wasserführung ab. Im allgemeinen ist die Lösung um so verdünnter, je bedeutender die Wasserführung ist. Bei Hochwasser ist daher der Salzgehalt geringer als bei Niederwasser. Die chemische Zusammensetzung des Wassers der Zuflüsse ist infolgedessen ziemlich beträchtlichen jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Trotzdem sind in Flußseen, da ihre Wassermasse meistens sehr viel größer ist als die gesamte jährliche Wasserzufuhr der sie durchströmenden Flüsse, die Schwankungen des Salzgehaltes kleiner, meist sogar sehr klein. Damit sich der Gehalt des Seewassers an irgend einem Salz um 1 mg per Liter ändert, muß die Zufuhr dieses Salzes um so viele Tonnen variieren, als der See Millionen Kubikmeter Wasser enthält. Daher kann eine merkbare Jahresschwankung des Salzgehalts nur bei Endseen in trockenen Klimaten mit scharf unterschiedener Trockenzeit und Regenzeit vorkommen.

B. Lokale Schwankungen. Im Gegensatz zu den jährlichen können die lokalen Schwankungen der Zusammensetzung des Seewassers, d. h. die Aenderungen desselben von Ort zu Ort, oft sehr beträchtlich sein.

Jeder Zufluß hat seinen bestimmten, von demjenigen seiner Nachbarn verschiedenen Salzgehalt. Dieser Salzgehalt ist gleichzeitig verschieden von demjenigen des Seewassers, da dessen Wasser das Mittel aus sämtlichen Zuflüssen darstellt.

Das Wasser der Zuflüsse verteilt sich im Innern des Sees je nach seiner Natur und seinem Ursprung auf sehr verschiedene Weise.

a) Das Regenwasser hat als chemisch fast reines Wasser eine geringe Dichte. Es fällt stets auf weite Flächen des Sees und verdünnt die obersten Wasserschichten desselben.

b) Das Flußwasser ist immer mehr oder weniger salzhaltig. Es ergießt sich an der Einmündung der Zuflüsse in den See. Dort erleidet es, je nach seiner aus seiner Temperatur und dem Gehalt an gelösten und schwebenden Stoffen sich ergebenden Dichte, wechselnde Schicksale. Entweder ist es leichter als das Seewasser; dann breitet es sich über demselben aus und verbleibt an der Oberfläche. Die Mischung mit dem darunter liegenden Seewasser erfolgt nur langsam unter dem Einfluß der Wellen und Strömungen. Das Auftreten von leicht trüben Wassermassen, die tage- und wochenlang an der klaren Oberfläche des Sees Flecken bilden, ist hierfür beweisend.

Wenn das Wasser des Zuflusses schwerer ist, als das Oberflächenwasser des Sees, so sinkt es unter und immer tiefer, bis es in mittleren Tiefen des Sees eine seiner Dichte entsprechende Schicht erreicht, wo es sich alsdann ausbreitet.

Oder endlich, es ist schwerer als das Wasser der dichtesten Schichten des Sees; dann sinkt es sogleich bis auf die Sohle des Sees und breitet sich hier über der centralen Ebene aus.

Die relative Dichte des Wassers der Zuflüsse hängt von drei Faktoren ab, von ihrer Temperatur, ihrem Gehalt an suspendiertem Schlamm und ihrem Gehalt an gelösten Stoffen. Die Resultante dieser drei Faktoren bestimmt die Dichte des zufließenden Wassers und folglich

auch die Lage der Schicht, in oder über welcher es sich im See ausbreitet.

Zwei dieser Faktoren sind jedoch nicht konstant, sondern ändern sich im See in kurzer Zeit: Die Temperatur des Flußwassers wird allmählich gleich derjenigen des umgebenden Seewassers; dadurch nimmt die Dichte des Flußwassers zu oder ab. Ferner setzt sich der schwebende Schlamm ab, dadurch eine Abnahme der Dichte hervorrufend. Die hieraus entspringenden Veränderungen der Dichte bewirken, daß das in den See gebettete Flußwasser seinen Ort nicht beibehält, sondern sich bald verlagert. Es verläßt seine erste Lagerstätte, steigt empor oder sinkt in die Tiefe, so daß seine definitive Lage nur vom dritten Faktor, der dem Salzgehalt entsprechenden Dichte, abhängig ist. Erst wenn es seine definitive Lage gefunden hat, ist das Flußwasser dem See ganz einverleibt und zu Seewasser geworden. So bleibt immerhin im allgemeinen eine Schichtung des Wassers nach dem Salzgehalt erhalten, wonach die dichteren Wassermassen sich am Grunde, die leichteren an der Oberfläche befinden.

Es fragt sich nun, ob diese Schichtung nicht durch Convektionsströmungen gestört werden kann, indem durch eine vollständige Umwälzung (siehe unten) die thermische Schichtung aufgehoben und bis auf den Grund des Sees eine einförmige Temperatur hergestellt wird, ein Fall, der in der That bei tropischen Seen am Ende eines strengen Winters, bei polaren Seen am Ende des Sommers eintreten kann. Daß aber die in diesem Fall auftretenden Convektionsströmungen, die die übereinander lagernden Schichten in vertikaler Richtung in Bewegung setzen und mischen, zugleich auch die Schichtung nach dem Salzgehalt oder, kürzer gesagt, die saline Stratifikation vernichten können, möchte ich bezweifeln. Die aus der Abkühlung der oberflächlichen warmen Schichten resultierende Zunahme der Dichte beeinflußt die aus dem Salzgehalt resultierenden Dichteunterschiede durchaus nicht. Die obere leichte Schicht sinkt beim Erkalten unter und breitet sich in der Tiefe über einer Schicht

von gleicher Temperatur, aber größerem Salzgehalt aus. So führen diese inneren, durch die thermische Convektion bedingten Strömungen geradezu eine dauernde Schichtung nach der Salinität herbei. Sein Salzgehalt ist daher die hervorstechendste Eigenschaft des Seewassers, die einzige, die beständig bleibt.

Wie verhalten sich zwei Wassermassen, die bei verschiedener chemischer Zusammensetzung die gleiche Dichte besitzen? Nehmen wir an, beide hätten die gleiche Dichte, die jedoch bei der einen durch einen Gehalt an Calciumkarbonat, bei der anderen durch einen Gehalt an Gips bedingt ist. Beide sollen bei weitem nicht gesättigt sein. Beide Wassermassen werden offenbar bei ihrem Eintritt in den See bis auf die ihrer Dichte entsprechende Tiefe sinken. Zuerst bleibt jede selbständig neben der anderen bestehen; sodann aber werden Diffusionserscheinungen eintreten, durch die sie sich mit dem umgebenden Seewasser mischen. Sie verlieren auf diese Weise einen Teil ihres spezifischen Salzgehaltes, nehmen aber dafür aus der Umgebung andere Salze, die ihnen früher fehlten, auf, so daß sie schließlich eine mit derjenigen des Seewassers identische Zusammensetzung erlangen.

Es wäre leicht zu zeigen, daß nur das im Wasser dominierende Salz die saline Stratifikation hervorruft, indem nur seine relativen Quantitäten wechseln. Die übrigen Salze, die in der Lösung nur accessorisch vorkommen, werden in der ganzen Masse des Sees gleichmäßig verteilt.

Einzig die durch die mechanische Wirkung der Winde hervorgebrachten, alles durcheinanderrührenden Strömungen können die saline Stratifikation zerstören. Doch müssen wir nicht vergessen, daß die Gegenströmungen, die bei Anwesenheit von Oberströmen auftreten, gewöhnlich in den oberen oder mittleren Schichten verlaufen, die großen Tiefen aber von ihnen nicht berührt werden. Wir können deshalb annehmen, daß ihre Wirkung für die Zerstörung der salinen Stratifikation nicht allzu bedeutend ist. Die Wassermassen eines Süßwassersees sind daher ganz allgemein nach ihrer Salinität

geschichtet: die tiefen Schichten sind salzhaltiger als die oberen [1]).

Der Abfluß des Sees entführt im wesentlichen nur Oberflächenwasser, dessen Salzgehalt geringer ist als der mittlere Salzgehalt des Sees und als der Salzgehalt der mit gelösten Stoffen besonders reich beladenen Zuflüsse. Infolgedessen wird das Wasser des Sees die Tendenz zeigen, seinen Salzgehalt zu vergrößern, so daß er im Laufe langer Zeiten in den tiefen Schichten ebenso groß werden kann, wie der Salzgehalt des salzreichsten seiner Zuflüsse es ist. Theoretisch ist daher der mittlere Salzgehalt eines Süßwassersees größer als der mittlere Salzgehalt seiner sämtlichen Zuflüsse zusammengenommen. In Wirklichkeit ist aber diese Differenz sehr klein oder Null.

5. Gasgehalt des Seewassers.

Das Wasser der Zuflüsse hat beim Kontakt mit der Atmosphäre beim Fließen oder während es dieselbe in Form von Regen durcheilte, mit Sauerstoff, Stickstoff, Argon und Kohlensäure aufgenommen. Das Seewasser ist infolgedessen ursprünglich durchlüftet.

Das Absorptionsvermögen des Wassers für Gase wird durch dessen Gehalt an gelösten, festen Körpern nur wenig beeinflußt. Gesättigtes Wasser enthält bei normalem Druck im Liter 7 cm^3 Sauerstoff, 14 cm^3 Stickstoff und 6,5 cm^3 Kohlensäure. Dieses Mengenverhältnis der im Wasser gelösten Gase wird jedoch durch den Aufenthalt des Wassers im See etwas modifiziert. In dieser Beziehung ist zwischen dem Wasser der Oberfläche und dem Wasser in den tiefen Schichten zu unterscheiden.

A. Das Oberflächenwasser. Die Oberfläche des Sees ist in ständiger Berührung mit der Atmosphäre. Der Gasaustausch zwischen beiden Medien findet ungehindert statt, so daß die partiellen Spannungen der Gase

[1]) Delebecque hat diese Thatsache an verschiedenen Seen nachgewiesen. Im Lac de la Girotte, wo der Unterschied bis 450 mg per Liter betragen kann, enthalten die Oberflächenschichten 69 mg, die tiefen Schichten bei 95 m Tiefe 521 mg Salze per Liter. (Lacs français, p. 199.)

in beiden Medien gleich sind. Dieses Gleichgewicht, d. h. das Verhältnis der verschiedenen im Wasser gelösten Gase wird nun aber durch zwei Faktoren gestört, während die Zusammensetzung der Atmosphäre dieselbe bleibt. Diese beiden störenden Faktoren sind die Temperatur des Wassers und der Luftdruck.

a) Die Temperatur des Wassers. Der Absorptionskoeffizient des Wassers für Gase ändert sich in umgekehrtem Verhältnis wie die Temperatur, und zwar beträgt er bei einer

Temperatur des Wassers	für Sauerstoff	für Stickstoff	für Kohlensäure
0°	0,0421	0,0203	1,797
5°	0,0362	0,0179	1,449
25°	0,0284	0,0140	0,901

Es folgt daraus, daß unter gleichen Verhältnissen kaltes Wasser mehr Gas gelöst enthält als warmes. Da die Luft bei normaler Zusammensetzung 0,208 Sauerstoff, 0,792 Stickstoff und 0,0004 Kohlensäure enthält, so beträgt die Menge der im Wasser bei einem Barometerstand von 760 mm gelösten Gase bei verschiedener Temperatur in einem Liter:

Temperatur	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlensäure
5°	7,5 cm^3	14,2 cm^3	0,5 cm^3
25°	4,5 cm^3	8,4 cm^3	0,3 cm^3

b) Luftdruck. Die Menge der gelösten Gase ist direkt vom Druck abhängig. Ein in der Tiefebene gelegener See enthält mehr Gas gelöst als ein Bergsee.

Da die Wassertemperatur und der Luftdruck auf jedem See wechseln, so beladen sich die oberen Wasserschichten bei steigendem Barometerstand und sinkender Temperatur mit Gas, während sie bei sinkendem Luftdruck und steigender Temperatur Gas abgeben. Die Wirkung der Temperaturänderungen ist jedoch viel bedeutender als diejenige der Druckänderungen. Wenn die Temperatur von 0° auf 25° steigt, so nimmt die Absorptionsfähigkeit des Wassers für Gase um 30—40% ab; bei den extremsten Schwankungen des Luftdrucks hingegen schwankt sie nur um 6%.

Gewöhnlich ist das Oberflächenwasser des Sees mit Gasen gesättigt. Ist die Sättigung nicht vollständig, so nimmt das Wasser Gase aus der Atmosphäre auf; tritt Uebersättigung ein, so werden Gase an die Atmosphäre abgegeben: es bilden sich dann Luftbläschen im Wasser, die an der Oberfläche platzen.

Dieser normale Zustand wird jedoch durch verschiedene Einwirkungen gestört. Tiere, Pflanzen und aërobe Mikroben absorbieren durch ihren Atmungsprozeß den gelösten Sauerstoff und geben dafür Kohlensäure an das Wasser ab. Bei den Pflanzen überwiegt die reduzierende Chlorophyllfunktion, wenigstens am Tage, so daß das Oberflächenwasser mit Sauerstoff bereichert wird. Tote organische Substanzen zersetzen sich unter dem Einfluß der Fermente und geben Kohlensäure, Kohlenwasserstoffe, Ammoniakverbindungen etc. ab. In pflanzenreichen Seen ist das Wasser tagsüber infolge der starken Kohlensäurereduktion durch die Pflanzen mit Sauerstoff einigermaßen übersättigt. Sonst herrscht im Gegenteil eine Tendenz zur Uebersättigung mit Kohlensäure vor. Da die Ammoniakgase außerordentlich leicht löslich sind, so werden sie leicht absorbiert; weil jedoch ihre Spannung in der Luft gleich Null ist, so verflüchtigen sie sich bald vollständig. Die Kohlenwasserstoffe, das Methan oder Sumpfgas im besonderen, das ein Produkt des Fäulnisprozesses organischer Substanzen ist, hat nur eine sehr geringe Löslichkeit im Wasser. Es entweicht daher in Form von größeren oder kleineren Bläschen in die Luft, wo es sich verliert.

So ist das Oberflächenwasser eines Sees mit den Gasen der Atmosphäre gesättigt; es ist ein gut durchlüftetes, wegen eines Ueberschusses an Kohlensäure ganz schwach säuerliches Wasser.

B. Das Wasser der tiefen Schichten. Die Löslichkeit der Gase nimmt mit steigendem Druck zu. Je größer der letztere, desto größere Mengen Gas absorbiert das Wasser; deshalb könnten die tiefen Schichten eines Sees ganz gewaltige Mengen Gas enthalten. Für eine bestimmte Schicht wäre die lösliche Menge annähernd

gleich dem Gasvolumen des Oberflächenwassers, multipliziert mit der in Dekametern ausgedrückten Tiefe der Schicht (10 m Wasser entsprechen einem Druck von 0,97 Atmosphären).

Obschon dementsprechend die tiefen Schichten große Gasvolumina enthalten könnten, so ist doch in Wirklichkeit der Gasgehalt in der Tiefe nicht oder kaum größer als an der Oberfläche. Die tiefen Schichten können nämlich Gase nur aus der Atmosphäre und zwar auf zwei verschiedenen Wegen entnehmen:

a) Direkt. Das konnte nur geschehen, während das jetzt in der Tiefe befindliche Wasser noch an der Oberfläche war und mit der Atmosphäre in direkter Berührung stand. In diesem Falle kann es natürlich auch, nachdem es zur Tiefe gesunken ist, nur die dem Druck einer einzigen Atmosphäre entsprechende Menge Gas enthalten.

b) Indirekt durch Diffusion, indem die Oberflächenschichten die der Atmosphäre entnommenen Gasmengen an die mittleren und diese weiter an die tiefen Schichten abgeben. Diffusion kann aber nur aus einer Schicht erfolgen, in der die normale Spannung der Gase überschritten ist. Wie groß auch das Absorptionsvermögen der nach unten folgenden Schicht sein mag, sie kann von der oberen nicht mehr Gas empfangen, als diese selbst enthält. Da die Spannung in der Oberflächenschicht in konstantem Verhältnis zum atmosphärischen Druck steht, d. h. normal ist — die Ausgleichung schwacher momentaner Unterschiede findet nach der Richtung des geringsten Widerstandes, d. h. nach oben hin statt — so kann die erste Schicht an die darunterliegende auch nur die normale Gasmenge abgeben. Die tiefen Schichten des Sees, die mit der Atmosphäre nur durch die Oberflächenschichten in Kommunikation stehen, können daher nie mehr Gas enthalten, als diese selbst besitzen.

Das Wasser der Tiefenregion ist also Oberflächenwasser, das zur Tiefe gesunken ist, und infolgedessen nur mit der dem gewöhnlichen Druck entsprechenden Gasmenge beladen. Dieses Herabsinken findet jedoch

hauptsächlich in thermischen Convektionsströmen statt, wenn die Temperatur des Oberflächenwassers bis zur Temperatur des Tiefenwassers gesunken ist. Der Gasgehalt in den tiefen Schichten entspricht daher demjenigen, den das Oberflächenwasser während der kalten Jahreszeit besitzt; er ist daher ziemlich bedeutend.

In großen Tiefen erleidet der Gasgehalt einige Veränderungen, die das Mengenverhältnis der gelösten Gase etwas beeinflussen können. Es gehören dahin insbesondere biologische und chemische Vorgänge. Durch den Atmungsprozeß der Tiefenfaunen und -floren wird Sauerstoff absorbiert und Kohlensäure produziert; die faulenden organischen Substanzen entwickeln Kohlensäure, Kohlenwasserstoffe und Ammoniakverbindungen. Diese beiden letzteren Gase entweichen nach und nach durch das Wasser in die Atmosphäre. Dagegen zeigt sich in den Tiefenschichten, wie aus den Analysen hervorgeht, eine Tendenz zu einem Ueberschuß an Kohlensäure und zu einem Defizit an Sauerstoff[1]). Dieses Defizit kann durch die Assimilationsthätigkeit des pflanzlichen Chlorophylls nicht gedeckt werden, wie das in den Oberflächenschichten geschieht, weil grüne Pflanzen wegen der rasch erfolgenden völligen Absorption des Tageslichtes schon in den mittleren Schichten des Sees selten sind und in den tiefen ganz fehlen.

6. Organische Substanzen.

Das Seewasser enthält wechselnde Mengen organischer Substanzen in Lösung. Diese Substanzen können stammen:

a) aus dem Regenwasser, das sie der Atmosphäre entnommen hat;

b) aus dem Wasser der Zuflüsse, das die Erde ihres Nährbeckens ausgewaschen und außerdem die Abfälle menschlicher und tierischer Niederlassungen aufgenommen hat;

---

1) (Walther) vergl. F. A. Forel, Le Léman II. 621.

c) von den Tieren und den Pflanzen, die im See und in dessen Zuflüssen leben und organische Verbindungen absondern, sowie von ihren in Verwesung begriffenen Leichen.

Solche organische Substanzen sind unter anderem:

a) Kohlensäure,

b) Methan, andere Kohlenwasserstoffe, Humussäure, Ulminsäure, alles Verwesungsprodukte der Cellulose.

c) Ammoniak und Eiweißkörper in allen Zersetzungsstadien;

d) salpeterige Säure und Salpetersäure.

Die Gesamtmenge der organischen, mittels Kaliumpermanganat bestimmbaren Substanzen überschreitet selten 1—2 cg per Liter. Wir werden auf diese Körper bei der Darstellung der biologischen Verhältnisse der Seen noch einmal zu sprechen kommen.

IV. Kapitel.

Thermik.

1. Allgemeines.

Die Wassertemperatur kann im See von einem Punkt zum anderen, von einer Schicht zur anderen verschieden sein; sie erleidet regelmäßige periodische und unregelmäßige Schwankungen. Die Gewässer des Sees sind kalorischen Absorptions- und Emissionsvorgängen unterworfen; es findet ein beständiger Wärmeaustausch zwischen den verschiedenen Schichten des Wassers und ihrer näheren und weiteren Umgebung statt.

Folgende Wärmequellen kommen für einen See in Betracht:

a) die direkte Wärmestrahlung der Sonne;

b) die Wärmestrahlung der über dem See liegenden Atmosphäre und der das Seebecken einrahmenden Gehänge;

c) die Wärme, die von der auf dem See ruhen-

den Luftschicht direkt durch Leitung an das Wasser abgegeben wird[1];

d) die latente Wärme, die bei der Kondensation von Wasserdampf an der Oberfläche des Sees frei wird;

e) die durch die Wasserzufuhr (Flüsse und Regen) herbeigebrachte Wärme;

f) die Umsetzung der mechanischen Arbeit des Windes in Wärme;

g) die Wärme, die durch biologische Prozesse (Lebensvorgänge der Pflanzen und Tiere) oder durch gegenseitige chemische Reaktionen der im Wasser gelösten Körper erzeugt wird;

h) die Eigenwärme der Erde.

Ein Wärmeverlust findet statt:

a) durch Wärmeausstrahlung in den Weltenraum und in die Atmosphäre;

b) durch Wärmeabgabe durch Leitung an die kalte Luft;

c) durch Zufluß von kaltem Wasser (Regen- oder Flußwasser);

d) durch Bindung von Wärme bei Verdunstung des Wassers an der Oberfläche des Sees und beim Schmelzen von Schnee oder Hagel, der in den See gefallen ist.

Die Wirkung der Mehrzahl dieser eine Wärmezufuhr oder Wärmeabfuhr bedingenden Faktoren darf ich als bekannt voraussetzen. Nur zwei Faktoren bedürfen einer genauern Darlegung.

Die Eigenwärme der Erde teilt sich durch Leitung den Schichten des Sees mit, die mit dem Gestein der Sohle und der Gehänge des Seebeckens in Berührung stehen. Der Effekt dieser Wärmezufuhr ist aber verschwindend klein. Bekanntlich vermag die im Laufe eines Jahres vom Erdinnern durch Leitung an die Erdoberfläche gelangende Wärme nur eine 5,2 mm dicke Eisschicht zu schmelzen. Da die Wärmemenge, die bei der Schmelzung eines Kilogramms Eis gebunden wird, 80 Kalorien beträgt, so könnte jene aus dem Erdinnern stammende

---

[1]) Richter hat gezeigt, daß diese Wärmezufuhr bedeutend schwächer ist, als die Wärmezufuhr direkt durch die Sonnenstrahlung. Seestudien. Pencks geogr. Abhandl. Bd. VI. H. 2. S. 70.

Wärmemenge nur eine Wasserschicht von 0,41 m Dicke um 1 Grad erwärmen oder eine Schicht von 4,1 m Dicke um 0,1 Grad. Das ist eine verschwindende Größe; der Einfluß der Eigenwärme kann daher in den allermeisten Fällen ganz vernachlässigt werden.

Der zweite Vorgang, der der Erläuterung bedarf, ist die durch das Wasser der Zuflüsse verursachte Erwärmung der tiefen Schichten des Sees. Wenn das Wasser eines Zuflusses klar ist und das gleiche spezifische Gewicht wie das Seewasser besitzt, so sinkt es sofort bei seinem Eintritt in den See bis zu jener Tiefe hinab, wo es Wasser von gleicher Temperatur trifft. Seine thermische Wirkung ist in diesem Fall Null. Meistens führen jedoch die Zuflüsse größere oder geringere Mengen suspendierten Schlammes, die ihr spezifisches Gewicht vergrößern [1]). Das Flußwasser ist daher meist schwerer als das Seewasser gleicher Temperatur. Es sinkt infolgedessen nach seiner Einmündung in den See tiefer hinab, als es seine Temperatur erfordern würde, und gelangt so in Tiefenschichten, die zwar die gleiche Dichte haben wie das Flußwasser, aber nach den Gesetzen der thermischen Stratifikation kälter sind als dasselbe. Das schlammbeladene Flußwasser mischt sich hier mit dem kalten Tiefenwasser und erwärmt es. Diese Wirkung kann in gewissen Fällen sehr bedeutend sein [2]).

Von allen direkten Wärmequellen, die für die Oberfläche der Erde in Betracht kommen, ist die Sonnenstrahlung die wichtigste. Die Wirkung der Sonnenstrahlung wird an der Oberfläche eines Sees insofern etwas modifiziert, als der See eine spiegelnde Fläche darstellt. Gleichviel ob seine Oberfläche durch den Wind bewegt oder ganz ruhig ist, immer wird ein Teil der einfallenden Wärmestrahlen reflektiert, ein anderer absorbiert. Aus den Untersuchungen von Louis Dufour im Jahre 1892 geht hervor, daß das Quantum der zu-

---

1) Vergl. Le Léman I. 367.

2) Bemerkt sei, daß, wenn bei verkehrter thermischer Stratifikation (z. B. im Winter) sich kaltes, sehr dichtes Wasser in den See ergießen würde, dieses Wasser die tiefen Schichten abkühlen müßte.

rückgeworfenen Wärme sehr bedeutend sein kann; unter den günstigsten Bedingungen, wenn die Sonne tief am Horizont steht und der Seespiegel glatt ist, kann dieses Quantum bis 68 % der Gesamtstrahlung betragen [1]). Meistens ist jedoch die Menge der reflektierten Wärme viel kleiner; der ganze Rest, der im ungünstigsten Fall immer noch ein Drittel aller auffallenden Strahlen beträgt, wird vom Wasser absorbiert. Er dringt in die oberen Schichten des Sees ein und erwärmt sie.

Die Rolle, die die einzelnen Teile des Sees beim Wärmeaustausch spielen, ist folgende:

Durch Vermittelung des Seebodens, zu dem wir auch die Wandungen des Seebeckens rechnen, findet nur Wärmezufuhr vom Erdinnern statt, die wir nach dem oben Gesagten vernachlässigen können.

Die mittleren und tiefen Schichten des Sees werden durch das Wasser der Zuflüsse erwärmt oder in seltenen Fällen abgekühlt.

Durch die oberen Schichten des Sees findet sowohl Wärmegewinn als Wärmeverlust statt; sie sind der Schauplatz der größten und wichtigsten thermischen Wechselwirkungen. In direktem Kontakt mit der Atmosphäre stehend, werden sie bald erwärmt, bald abgekühlt. An der Oberfläche allein findet auch die Aufnahme wie die Abgabe strahlender Wärme statt.

Aus diesem verschiedenen Verhalten der verschiedenen Teile des Sees ergibt sich die Tendenz zu einer thermischen Differenzierung. Bald tritt Erwärmung ein, bald Abkühlung. Dieser fortwährende Wechsel betrifft nicht gleichzeitig die ganze Masse des Sees, sondern ist streng örtlich an bestimmte Schichten gebunden. So bildet sich eine scharfe Differenzierung der einzelnen Teile des Sees in thermischer Hinsicht aus.

Andererseits sind auch Vorgänge thätig, die diese Differenzierung aufzuheben und eine gleichmäßige Temperatur im See herzustellen versuchen; es sind das:

1. Die Wärmeleitung im Wasser von einer Schicht

---

[1]) Bull. Soc. Vaud. Sc. nat. XII. 1. Lausanne 1873.

zur anderen; sie ist thätig, ohne daß dabei eine Bewegung der Wassermassen stattfindet. Warmes Wasser teilt seine Wärme benachbartem kalten mit und erhöht so dessen Temperatur; kaltes Wasser kühlt seine Nachbarschaft ab.

2. Es findet ein Wärmeaustausch im Innern des Sees durch Fortbewegung ganzer Wassermassen statt; diese Wärmebewegung ist thermischen Ursprunges, wenn sie infolge der Erwärmung oder Abkühlung einer Wassermasse stattfindet (Convektion). Wassermassen von gleicher Temperatur und infolgedessen von gleicher Dichte streben sich zu vereinigen. Warme Wassermassen streben in die Höhe, kalte in die Tiefe.

Die Bewegungen, in denen der Wärmetransport erfolgt, können aber auch mechanischen Ursprunges sein, wenn sie durch einen äußeren Anstoß hervorgebracht werden, wie z. B. die durch Wind verursachten Strömungen etc. Sie bringen alsdann Schichten verschiedener Temperatur miteinander in Berührung, wobei eine thermische Ausgleichung durch Leitung oder durch Mischung stattfindet.

Die Thermik des Sees wird durch die physikalischen Eigenschaften seines Wassers bedingt. Die wichtigsten hier in Betracht kommenden Eigenschaften sind:

1. Der hohe Flüssigkeitsgrad des Wassers. Die Kohäsion der einzelnen Moleküle ist sehr gering, das Wasser daher sehr leicht beweglich. So kommt es, daß die leichten Wassermassen sich stets über die schweren lagern können. Es resultiert so eine Stratifikation derart, daß die Dichte des Wassers von oben nach unten zunimmt.

2. Die Diathermanität des Wassers gestattet der strahlenden Wärme in das Wasser einzudringen, wie auch aus dem Wasser auszutreten. Immerhin ist die Durchlässigkeit des Wassers für Wärme klein. Von sämtlichen von Melloni untersuchten Flüssigkeiten ist das Wasser am wenigsten durchlässig. Infolgedessen absorbieren die obersten Schichten des Sees den größten Teil der Sonnenstrahlen und nur ein kleiner Teil derselben dringt bis in die mittleren Schichten ein. Ebenso

wird, wenn das Wasser Wärme ausstrahlt, diese ausgestrahlte Wärme größtenteils den Oberflächenschichten entnommen; Abkühlung findet daher fast nur an der Oberfläche statt.

Im Wasser suspendierte feste Körper haben ein weit größeres Absorptionsvermögen für strahlende Wärme als reines Wasser. Daher erwärmt sich Wasser, das mit schwebendem Schlamme verunreinigt ist, unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung noch mehr, als reines.

Die Diathermanität des Wassers ist nach J. L. Soret für leuchtende Wärmestrahlen größer als für dunkle. Infolgedessen erwärmen sich die mittleren Schichten unter dem Einfluß der Sonnenstrahlung mehr, als sie sich durch Ausstrahlung abkühlen.

3. Die thermische Leitungsfähigkeit des Wassers ist sehr klein. F. H. Weber in Zürich hat den Leitungskoeffizienten des Wassers zu 0,0745 bestimmt, während derjenige des Quecksilbers 0,91 ist [1]). Mit diesem Koeffizienten hat Weber die Geschwindigkeit der Wärmeleitung in ruhendem Wasser berechnet. Er fand, daß in 24 Stunden die Wärme nicht weiter als 0,3 m geleitet wird und im Jahr nicht weiter als 6 m.

4. Das Wasser hat eine sehr bedeutende spezifische Wärme; sie ist größer als diejenige aller anderen Körper, die daraufhin untersucht sind; sie übersteigt diejenige der Metalle um das 3- bis 20fache, diejenige der Luft um das 3000fache.

5. Das Emissionsvermögen des Wassers ist sehr groß; nach Leslie soll es gleich demjenigen des Rußes sein.

6. Reines Wasser hat seine größte Dichte zwischen 3,9 und 4 ° C. (Temperatur des Dichtigkeitsmaximums); Wasser von 4 ° ist folglich am schwersten. Die Anwesenheit gelöster Körper drückt die Temperatur des Dichtigkeitsmaximums etwas herab. Bei denjenigen Mengen von Salzen, wie sie im Süßwasser vorhanden sind, kommt das nicht in Betracht, da ein Salzgehalt

[1]) Vierteljahresschr. d. Züricher Nat. Gesellsch. XXIV. 252. 1879.

von 1 ‰ die Temperatur des Dichtigkeitsmaximums noch nicht um 0,1° C. deprimiert. In Salzseen aber ist die Erniedrigung oft bedeutend.

7. Wasser im festen Aggregatzustand — Eis — hat eine geringere Dichte als Wasser von 0°; man schätzt sie auf 0,92. Eis schwimmt daher auf Wasser von 0°.

Wie gestaltet sich nun nach den physikalischen Eigenschaften des Wassers die Thermik des Sees?

1. Infolge des hohen Flüssigkeitsgrades des Wassers stellt sich stets eine Schichtung nach der Dichte ein, derart, daß die dichtesten, schwersten Wassermassen auf dem Grunde ruhen und die leichtern oben schwimmen.

2. Da das Dichtigkeitsmaximum für Süßwasser bei 4° liegt, so zeigt die thermische Schichtung ganz entgegengesetzte Verhältnisse, je nachdem das Wasser wärmer oder kälter als 4° ist. Warmes Wasser, d. h. Wasser, dessen Temperatur mehr als 4° beträgt, zeigt die direkte Temperaturschichtung, bei der die warmen Schichten auf den kälteren lagern: die Temperatur nimmt von oben nach unten ab. Kaltes Wasser, d. h. Wasser, dessen Temperatur zwischen 0° und 4° beträgt, zeigt verkehrte Temperaturschichtung; die wärmsten Massen befinden sich unten, die kältesten schwimmen oben: die Temperatur nimmt von oben nach unten zu.

3. Die Hauptquellen, die dem Seewasser Wärme zuführen, sind die Sonnenstrahlung und die Wärmezuleitung durch Berührung des Wassers mit warmer Luft. Die Hauptursachen der Wärmeverluste des Seewassers sind die Ausstrahlung in die Atmosphäre und in den Weltenraum und die Wärmeableitung durch Berührung mit kalter Luft. Diese Einwirkungen vollziehen sich nur an der Oberflächenschicht des Sees. Die übrigen thermischen Einwirkungen, die ich ihrer geringen Wichtigkeit wegen geradezu als accessorische bezeichnen möchte, können vorläufig unberücksichtigt bleiben. So ist es denn die Oberflächenschicht des Sees, die die großen Wärmegewinne und Wärmeverluste vermittelt.

4. Die thermischen Einwirkungen, denen die Oberfläche des Sees ausgesetzt ist, führen in der Wassermasse

desselben entweder eine schärfere Ausprägung der Temperaturschichtung herbei oder aber eine Schwächung, eventuell gar eine Aufhebung derselben.

5. Thermische Schichtung stellt sich ein oder verschärft sich bei direkter Schichtung (warm oben, kalt unten), wenn das Wasser des Sees sich an der Oberfläche noch mehr erwärmt, bei verkehrter Schichtung (kalt oben, warm unten), wenn das Wasser sich an der Oberfläche noch weiter abkühlt. Im ersten Fall dehnt sich das warme Oberflächenwasser infolge der weitergehenden Erwärmung, im zweiten das kalte Oberflächenwasser infolge der weitergehenden Abkühlung noch mehr aus und wird sonach leichter. Die Dichtedifferenzen zwischen oben und unten nehmen dadurch noch zu und die thermische Schichtung verschärft sich.

6. Im entgegengesetzten Falle wird die thermische Schichtung aufgehoben, die Temperatur gleicht sich zwischen oben und unten aus. Wenn sich ein warmer See an der Oberfläche abkühlt oder ein kalter See erwärmt, so wird die oberste Schicht dichter und sinkt unter, bis sie auf eine Schicht von gleicher Dichte stößt. Bei diesem Vorgang nimmt die Dicke der Oberflächenschicht mit gleicher, stets sinkender Temperatur — die sogenannte homothermische Schicht — progressiv zu, indem die vertikalen Convektionsströmungen die Oberflächenschichten mit den unmittelbar unter ihnen liegenden in dem Maß mischen, als durch Abkühlung (bezw. Erwärmung) ihre Temperatur diejenige der unteren Schichten annimmt. Die Temperatur der so entstehenden fortwährend an Dicke wachsenden Oberflächenschicht muß von oben bis unten als annähernd gleichmäßig angenommen werden. Der ganze Vorgang führt in dieser Weise zu einer Zerstörung der thermischen Schichtung und zur Ausgleichung der Temperatur in der gesamten in Mitleidenschaft gezogenen Wassermasse.

7. Dergleichen Vorgänge spielen sich, wie man sieht, sowohl in warmem als auch in kaltem Wasser ab; allerdings sind die Resultate ganz verschieden.

Schichtungstypus		Vorgang	Resultat des Vorganges
Warmes Wasser	Direkte Schichtung	Erwärmung	Schichtung
		Abkühlung	Aufhebung d. Schichtg.
Kaltes Wasser	Verkehrte Schichtung	Erwärmung	Aufhebung d. Schichtg.
		Abkühlung	Schichtung

8. Einfluß der Jahreszeiten. Da kalte und warme Jahreszeiten, die den Wärmehaushalt des Sees beeinflussen, einander im Laufe des Jahres ablösen, so ändern sich auch die thermischen Verhältnisse des Sees periodisch. Diese Verhältnisse lassen sich am besten graphisch darstellen.

Es seien eine Reihe von thermometrischen Lotungen Monat für Monat in den verschiedenen Tiefen des Sees gemacht worden. Man zeichnet alsdann die erhaltenen Werte in ein Koordinatensystem ein, indem man die Zeiten (Monate) als Abscissen, die Tiefen als Ordinaten abträgt. Verbindet man die Punkte gleicher Temperatur, so wird sich folgendes ergeben:

Innerhalb des Zeitraums, in dem der See eine Verschärfung seiner thermischen Schichtung erfährt, senken sich die isothermischen Linien im Bild schräg abwärts. Die gleiche Temperatur findet sich bei den verschiedenen Lotungen von Monat zu Monat in immer größeren Tiefen. Während der Zeit, in der die Temperatur des Sees sich ausgleicht, steigen dagegen die isothermischen Linien senkrecht auf, damit anzeigend, daß in der ganzen oberen Schicht die gleiche Temperatur herrscht.

Auf dieser Grundlage beruhen die weiter unten wiedergegebenen schematischen Darstellungen.

9. Gestützt auf diese Erwägungen gelangen wir zu einer logischen Einteilung der Seen nach ihrem thermischen Verhalten. Wir unterscheiden drei Typen von Seen, je nachdem ihr Wasser immer warm, d. h. über der Temperatur des Dichtigkeitsmaximums (tropische Seen), abwechselnd warm und kalt (temperierte Seen) oder immer kalt (polare Seen) ist. Diese Namen, die den thermischen Typus eines Sees bezeichnen, sind den Namen der Zonen der Erde entnommen, in denen die betreffenden Typen am besten charakterisiert auftreten.

Damit soll aber nicht gesagt sein, daß ein in der tropischen Zone gelegener See notwendigerweise dem tropischen Typus angehöre. Liegt der betreffende See in einem Hochland, so kann er sehr wohl den gemäßigten Typus zeigen. Ebenso können große, genügend tiefe Seen der temperierten Zone dem tropischen Typus angehören.

10. Tropische Seen. Das Wasser der tropischen Seen ist immer warm, d. h. seine Temperatur ist stets über der Temperatur des Dichtigkeitsmaximums (4 ° für Süßwasser). Tropische Seen sind deshalb immer direkt thermisch geschichtet. Während des Frühlings und des

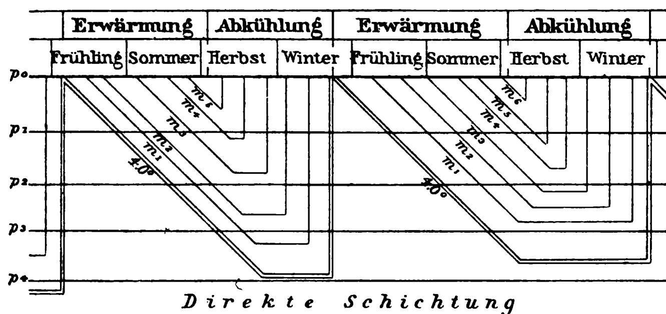


Fig. 7. Temperaturschichtung eines tropischen Sees.
„p_0 Oberfläche; p_1, p_2 . . Tiefen. Die Isotherme von 4° ist doppelt, die Isothermen (m_1, m_2 . . .) über 4° sind einfach ausgezogen, diejenigen (n_1, n_2 . .) unter 4° (Fig. 8 u. 9) gestrichelt."

Sommers, d. h. in der warmen Jahreszeit überwiegt die Wärmezufuhr. Die Temperatur der Wasseroberfläche erhebt sich rasch über diejenige der tiefen Schichten. Im Herbst und im Winter — in der kalten Jahreszeit — überwiegt die Abkühlung, der See gibt von seiner Oberfläche aus Wärme ab. Mit zunehmender Abkühlung nimmt auch die Dicke der Oberflächenschicht fortwährend zu, weil ihre Temperatur auf diejenige der unter ihr liegenden Schicht sinkt, und so der Dichteunterschied vernichtet wird. Die beiden Schichten verschmelzen thermisch. Die thermische Ausgleichung überwiegt. (Vgl. Fig. 7.)

Tropische Seen sind auf die tropischen Regionen und auf die niederen Breiten der wärmeren gemäßigten Zone beschränkt (große Seen Oberitaliens, Genfer See).

11. Polare Seen. Die thermischen Verhältnisse der polaren Seen sind denjenigen der tropischen Seen gerade entgegengesetzt. Sie besitzen immer kaltes Wasser, dessen Temperatur stets niedriger als 4° ist. Die thermische Schichtung ist hier stets verkehrt. Während der Zeit der überwiegenden Wärmezufuhr (Frühling und Sommer) gleicht sich die Temperatur zwischen oben und unten aus, die Schichtung wird aufgehoben; während der Periode der überwiegenden Wärmeabgabe (Herbst und Winter) verschärft sie sich (Fig. 8).

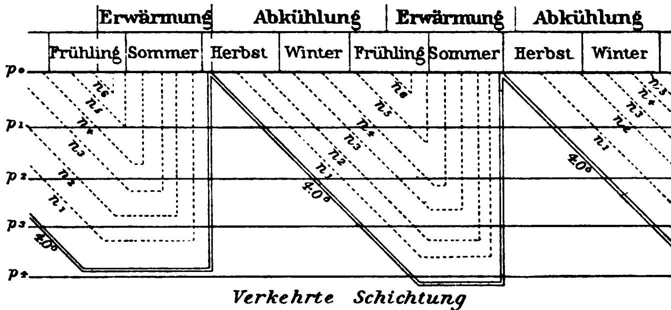


Fig. 8. Temperaturschichtung eines polaren Sees.

Polare Seen finden sich in den polaren Regionen und auf hohen Gebirgen der gemäßigten Breiten.

12. Temperierte Seen. In den temperierten Seen wird das warme Wasser des Sommers im Winter regelmäßig durch kaltes Wasser ersetzt. So kommt es, daß an solchen Seen im Laufe des Jahres beide eben geschilderten Typen, der tropische und der polare, mit den Jahreszeiten abwechselnd sich zeigen. Es ergeben sich folgende Verhältnisse:

Sommer	Warmes Wasser	Schichtung	tropischer Typus
Herbst	—	Ausgleichung	
Winter	Kaltes Wasser	Schichtung	polarer Typus
Frühling	—	Ausgleichung	

Je nach den klimatischen Verhältnissen, unter denen der temperierte See sich findet, überwiegt die Zeitdauer, in der der See den tropischen Typus zeigt, oder die Zeitdauer des polaren Typus. (Siehe das Schema, Fig. 9.)

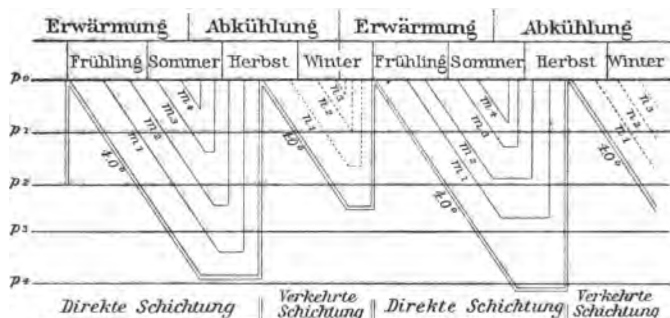


Fig. 9. Temperaturschichtung eines temperierten Sees.

Stellt man die drei Schemata so übereinander, daß die gleichen Jahreszeiten sich in derselben Vertikalen befinden, so erkennt man auf den ersten Blick, daß die thermischen Vorgänge bei den drei Seetypen vollständig verschieden sind (siehe die Tafel S. 112). Im folgenden versuche ich diese Vorgänge durch typographische Zeichen zu veranschaulichen. S bedeutet den Vorgang der Schichtung, A den Vorgang der Aufhebung derselben.

	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
Tropische Seen	S	S	A	A	S	S	A
Temperirte „	A	S	A	S	A	S	A
Polare „	A	A	S	S	A	A	S

13. Wir werden später sehen, daß die Temperaturschwankung von den oberen Schichten des Sees sich bis in eine Tiefe von ca. 100 m und sogar noch tiefer, doch nicht viel tiefer, bemerkbar macht; in Seen, deren Tiefe weniger als 100 m beträgt, werden sich daher die Temperaturschwankungen der Oberfläche bis auf den Grund fortpflanzen, während in sehr tiefen Seen die unteren Schichten eine relativ gleichförmige Temperatur behalten.

14. Aus dieser Beschränkung der Temperaturschwankungen auf die oberen Schichten des Sees ergibt

sich weiter, daß Seen, die in Grenzregionen, zwischen extremen (polaren und temperierten und tropischen) Klimaten gelegen sind, sich je nach ihrer Tiefe bald mehr dem einen, bald mehr dem anderen Typus nähern werden. Die seichten Seen, in denen die jährliche Temperaturschwankung sich in der ganzen Wassermasse bemerkbar macht, werden hier dem temperierten Typus angehören, während benachbarte tiefe Seen, in denen die Temperatur der tiefen Schichten das Jahr hindurch konstant bleibt, dem extremen (polaren oder tropischen) Typus folgen.

15. Die Temperatur der unteren Schichten tiefer Seen kann durch folgendes Schema ausgedrückt werden.

Typus	*Temperatur der Tiefe*
Tropische Seen	$\geqq 4^0$
Temperierte „	$\doteq 4^0$
Polare „	$\leqq 4^0$

Nach diesen allgemeinen Betrachtungen wenden wir uns noch einigen speziellen Punkten zu.

2. Die Temperatur des Oberflächenwassers.

Die Oberflächenschicht des Sees weist die größten Temperaturschwankungen auf. Gerade sie interessiert uns auch am meisten, weil sie am leichtesten unseren Untersuchungen zugänglich ist und vor allem den Wärmeaustausch zwischen dem See und seiner Umgebung vermittelt. Die Temperatur der Oberfläche ändert sich einerseits von Ort zu Ort, andererseits auch periodisch von Zeit zu Zeit.

A) Oertliche Unterschiede der Temperatur.

Zwei Regionen sind hier auseinander zu halten, die pelagische und die littorale. In der littoralen Region schwankt die Temperatur des Wassers infolge der geringen Tiefe weit mehr, als in der pelagischen, die eine verhältnismäßig konstante Temperatur besitzt. Erwärmung und Abkühlung beeinflussen in der littoralen Region eine

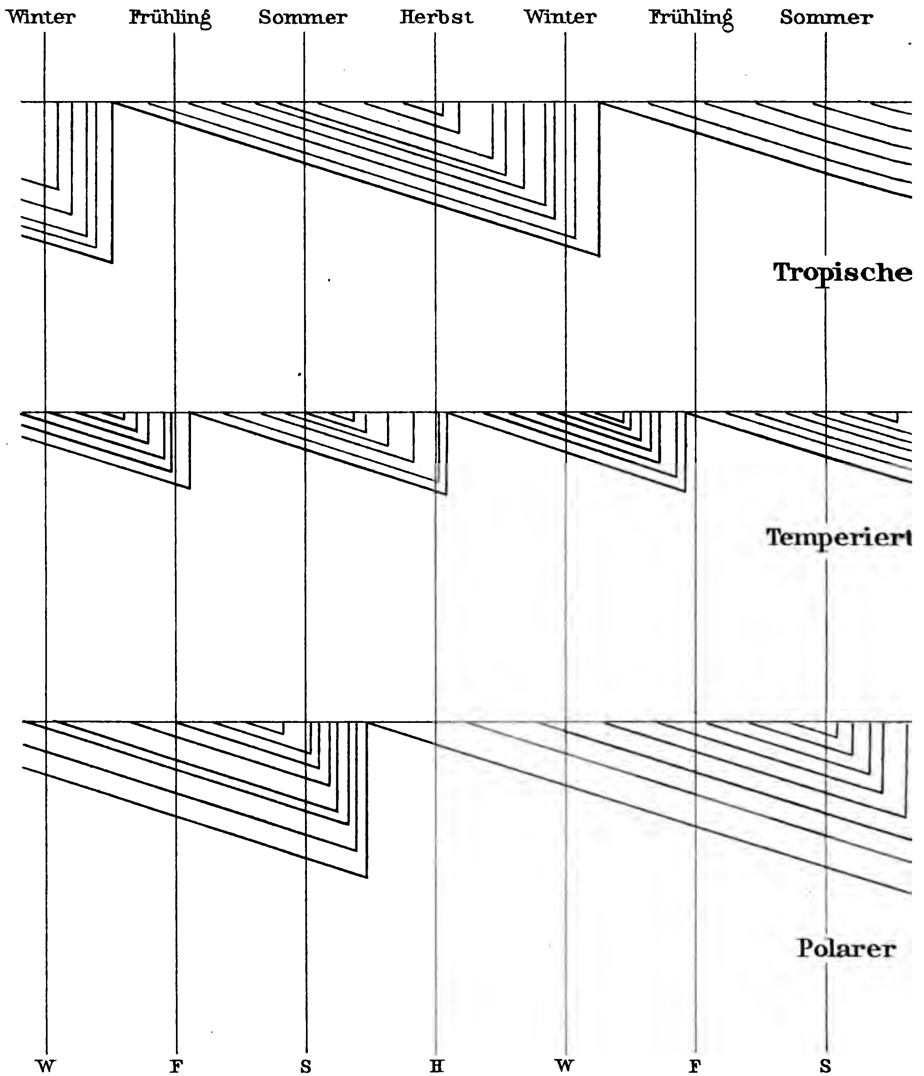
weniger mächtige Wasserschicht und sind daher weit wirksamer als im offenen See. Im Sommer ist das littorale Wasser wärmer, im Winter kälter als das Wasser in der Mitte des Sees. Wie wir später sehen werden, kann es sogar vorkommen, daß im gleichen See während des Winters in verschiedenen Regionen zwei verschiedene thermische Typen nebeneinander existieren. In der littoralen Region kann das kalte Wasser verkehrt geschichtet sein, ja es kann sogar gefroren sein, während im offenen See warmes Wasser mit direkter Schichtung vorhanden ist. Je weiter entfernt vom offenen See der Beobachtungspunkt am Ende einer schmalen Bucht sich befindet, desto größere Temperaturunterschiede findet man zwischen der Temperatur der Oberfläche der littoralen Region und der des offenen Sees.

Als wahre Oberflächentemperatur eines Sees möchte ich die Temperatur im offenen See im Centrum der pelagischen Region betrachten. Aber auch diese pelagische Oberflächentemperatur ist nicht so gleichmäßig, wie man es bei einer frei und offen kommunizierenden Flüssigkeit erwarten sollte. Man kann hie und da lokale Differenzen von mehreren Graden beobachten. Diese Differenzen sind hauptsächlich verursacht:

a) Durch den Wind, der mechanische Strömungen hervorbringt, indem er das Oberflächenwasser gegen das gegenüberliegende Ufer treibt. Infolgedessen bildet sich an der Leeküste ein aufsteigender Strom, der Wasser von ganz anderer Temperatur an die Oberfläche schafft.

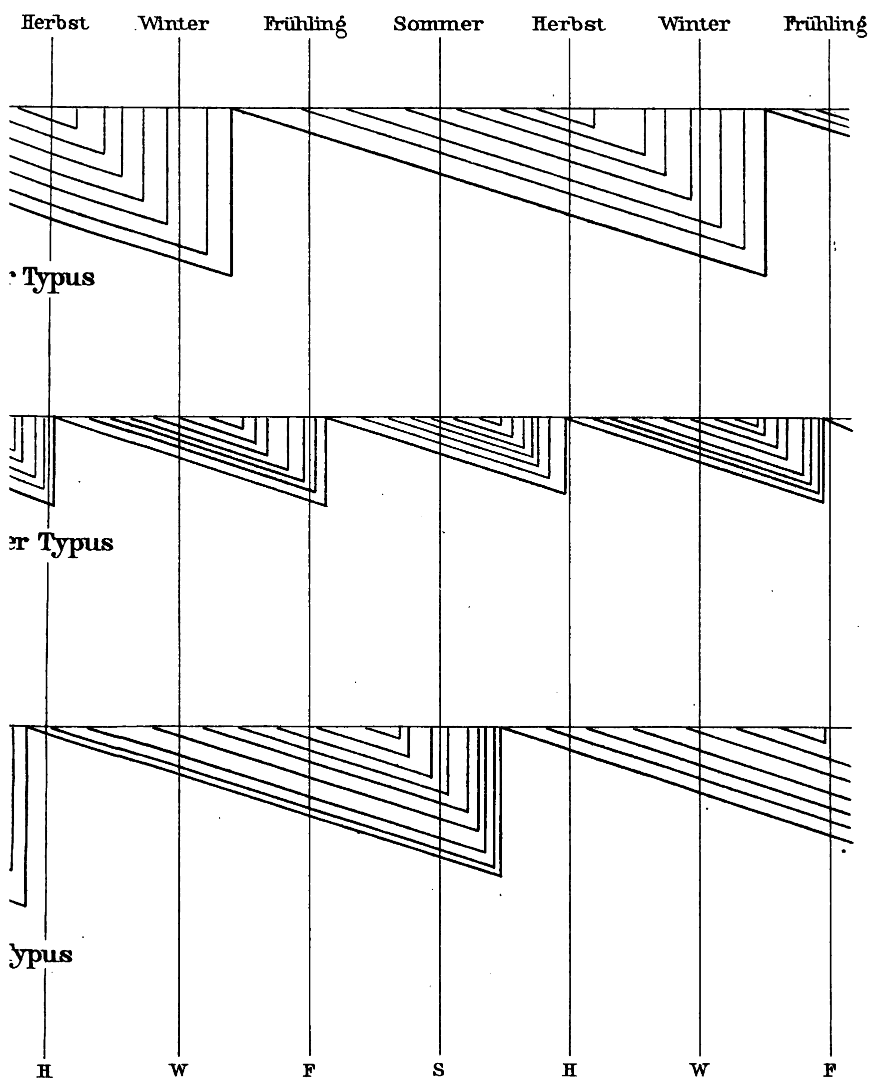
b) Durch die Wellen, die die Oberflächenschichten mit den unmittelbar darunter liegenden Schichten anderer Temperatur mischen.

c) Durch lokale Trübungen des Wassers, die bei der mechanischen Mischung des klaren Seewassers mit einem durch schwebende Bestandteile verunreinigten Wasser entstehen (trübes Wasser der Zuflüsse, Uferwasser, das bei Wellenschlag durch aufgerührten Schlamm getrübt ist). Trübes Wasser ist weniger diatherman als klares; es läßt die Sonnenstrahlen viel weniger durch und erwärmt sich daher schneller als klares.



Thermische Typen de

F.A.Forel

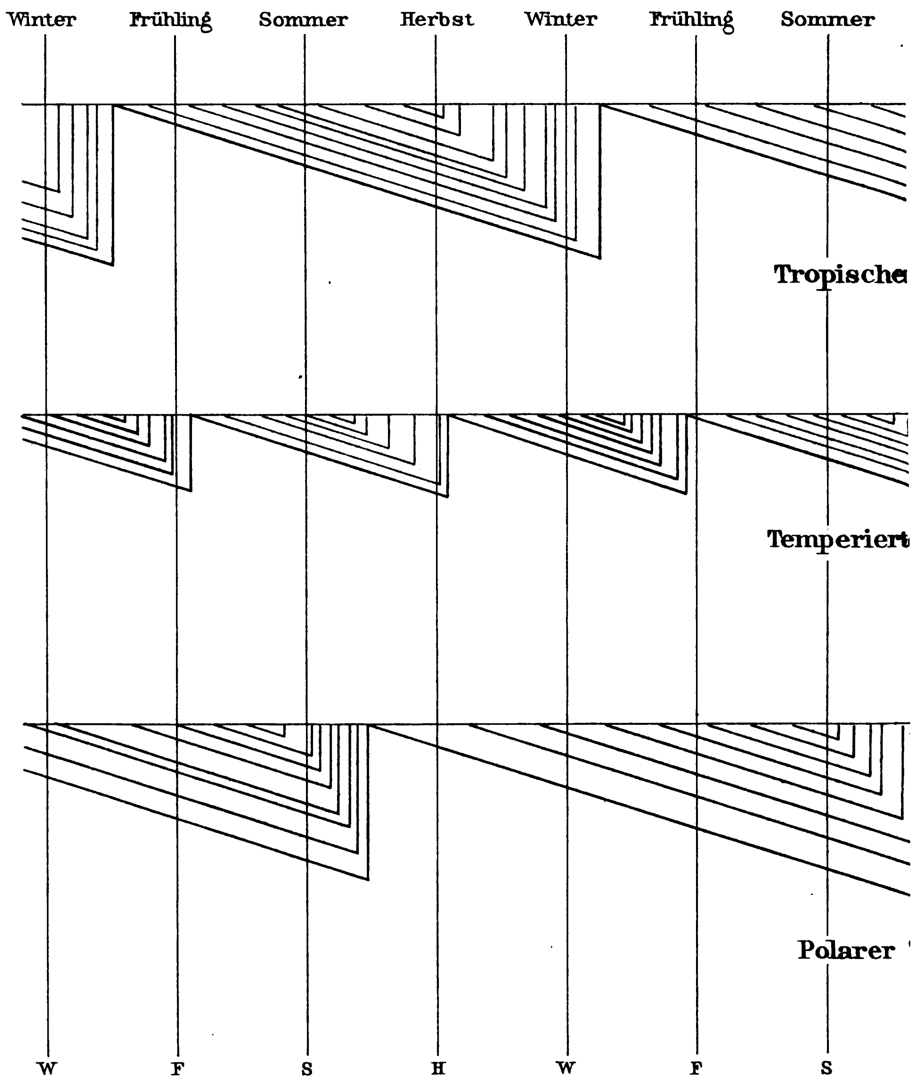


Süsswasserseen

1889

rn in Stuttgart

Geogr. Anst. v. Wagner & Debes, Leipzig

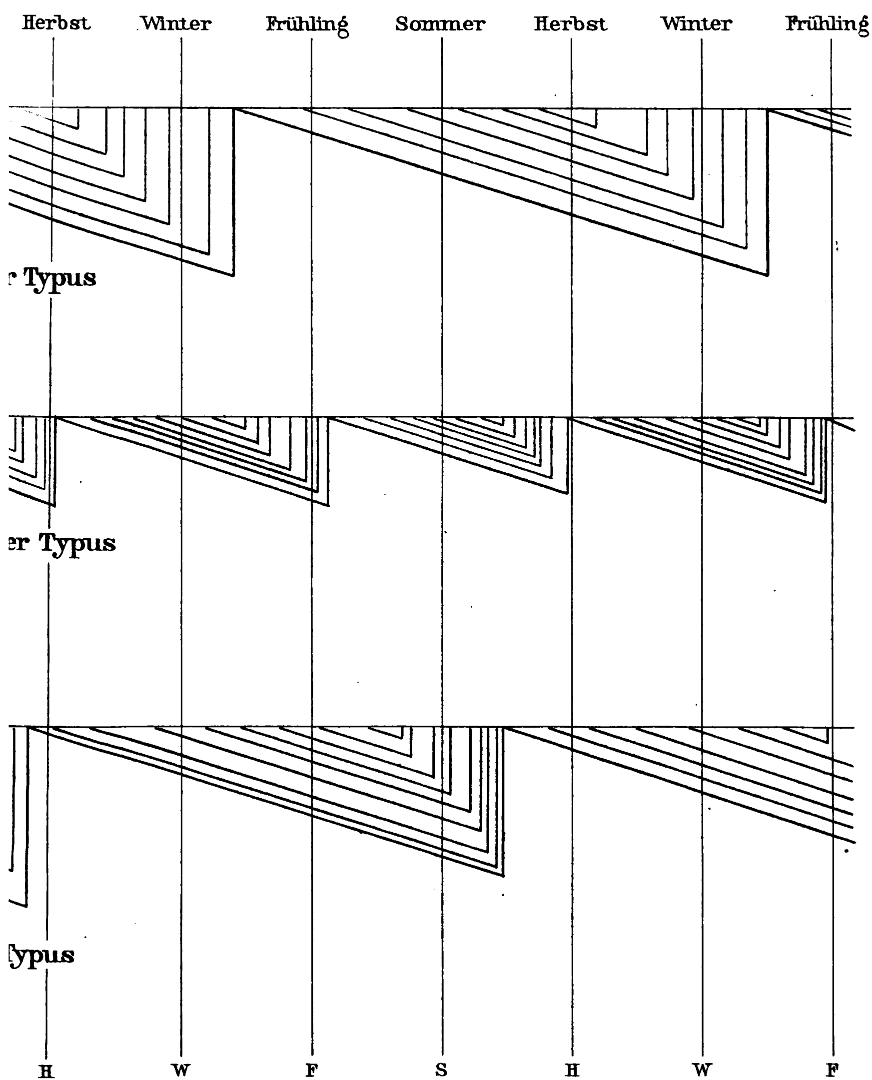


Thermische Typen de

F.A.Forel

Dr. F.A.Forel, Allgemeine Limnologie

Verlag von J.Engelh



Süsswasserseen

1889

rn in Stuttgart

Geogr. Anst. v. Wagner & Debes, Leipzig

d) Durch den lokalen Einfluß eines kalten oder warmen Regenschauers, eines Schnee- oder Hagelfalles.

e) Durch den an Umfang beschränkten Schatten, den eine Wolke oder ein Berg wirft, während die Oberfläche sonst überall von den Sonnenstrahlen getroffen wird.

Wäre das Wasser vollkommen und in allerhöchstem Grade flüssig und wären die horizontalen Abstände nicht zu groß, so würden sich diese lokalen Unterschiede sofort ausgleichen. So aber bleiben sie oft in ziemlichen Beträgen geraume Zeit bestehen.

B) Periodische Schwankungen.

a) Die tägliche Periode in den thermischen Erscheinungen äußert sich während des Tages in einer Erwärmung, während der Nacht in einer Abkühlung. Die Amplitude dieser täglichen Schwankung der Temperatur des Wassers kann in mittleren Breiten 2—4°, ausnahmsweise, nach Ed. Richter, bis 6° betragen. Das Temperaturmaximum tritt am Ende des Tages, das Minimum am Ende der Nacht ein. Der mittleren Temperatur entspricht die Temperatur der Oberfläche gegen Mittag und gegen Mitternacht.

b) Die jährliche Periode der Oberflächentemperatur macht sich durch ein Maximum in der warmen Jahreszeit und ein Minimum in der kalten geltend. Die Amplitude dieser Schwankung wird durch die klimatischen Verhältnisse der in Betracht kommenden Region bestimmt.

In den tropischen Seen sinkt das Minimum nicht unter 4°, das Maximum kann auf 25—30°, ja noch höher steigen.

In den polaren Seen schwankt die Temperatur der Oberfläche nur zwischen 0° und 4°.

In den temperierten Seen ist sie während der kalten Jahreszeit unter 4°, in der warmen über 4°. In den tiefen Seen der gemäßigten Zone steigt sie auch im Hochsommer kaum über 25°.

Die Größe der jährlichen Schwankung kann schon durch zwei unter geeigneten Bedingungen am Ende des Sommers und am Ende des Winters ausgeführte Temperaturmessungen bestimmt werden. Diese beiden Messungen charakterisieren den thermischen Typus des Sees genügend scharf. Zur Klassifizierung der Seen braucht man sich nur folgende Uebersicht der Oberflächentemperaturen zu vergegenwärtigen.

	Maximum	Minimum
Tropische Seen . .	$> 4^0$	$\geqq 4^0$
Gemäßigte „ . .	$> 4^0$	$< 4^0$
Polare „ . .	$\leqq 4^0$	$< 4^0$

3. Die Beziehungen der Temperatur des Sees zu derjenigen der darüber liegenden Luftmassen.

Da die spezifische Wärme des Wassers bedeutend größer ist, als diejenige der Luft, so wirken die gleichen thermischen Vorgänge auf die Luft viel rascher und viel intensiver ein, als auf das Wasser. Die thermischen Schwankungen der Atmosphäre sind viel größer und treten rascher ein als diejenigen der mit ihr in Berührung stehenden Seeoberfläche. Das äußert sich darin, daß im Winter die Luft kälter, im Sommer wärmer ist als das Wasser der Seeoberfläche. Die Temperaturänderungen treten auch in der Luft rascher ein; das Wasser hinkt nach. Im Frühling bleibt es noch kalt, während die Luft sich schon erwärmt hat; es ist daher kälter als die Atmosphäre; im Herbst bleibt der See länger warm als die Luft. Da die Temperatur des Sees das Bestreben hat, sich der anliegenden Luft mitzuteilen, so mildert der See das Klima, indem er vor allem die Temperaturextreme abstumpft.

4. Die Temperatur der Tiefe.

Mittels besonders eingerichteter Thermometer[1]) läßt sich die Temperatur der verschiedenen übereinander ge-

1) Thermometer Negretti und Zambra, Thermometer Miller-Casella.

lagerten Schichten des Sees bestimmen. Aus einer in der gleichen Vertikalen ausgeführten Serie von Lotungen ergibt sich die thermische Stratifikation in einem gegebenen Moment. Werden solche Serien zu verschiedenen Jahreszeiten ausgeführt, so ergeben sich die jahreszeitlichen Aenderungen, die die thermische Schichtung erfährt, und die Jahresperiode der Temperatur in den verschiedenen Tiefen.

Der hauptsächlichste Wärmeaustausch vollzieht sich, wie wir eben ausgeführt haben, an der Oberflächenschicht des Sees. Allein man darf daraus nicht etwa schließen, daß der Austausch auf diese Schicht beschränkt bleibt. In geringerem Maß und auf verschiedene Weise nehmen auch die mittleren und tieferen Schichten des Sees daran teil.

Da das Wasser diatherman ist, dringen die Sonnenstrahlen durch die Oberflächenschichten in die darunter liegenden ein; umgekehrt strahlen aber auch diese unteren Schichten Wärme durch die oberen in den Weltenraum aus. Wärmegewinne und -verluste pflanzen sich aber auch durch Leitung und durch mechanische und thermische Convektion in die Tiefe fort. So nehmen denn die tiefen Schichten an den thermischen Vorgängen, die sich an der Oberfläche abspielen, einen um so größeren Anteil, je näher sie derselben sind.

Der momentane thermische Zustand der Wassermasse des Sees ist stets das Resultat eines in einem früheren Moment bestandenen Wärmezustandes und der verschiedenen, seit jenem Moment durch verschiedene Einflüsse hervorgebrachten Aenderungen. Wenn diese modifizierenden Einflüsse den Sinn der thermischen Schichtung des Wassers nicht ändern, so bleiben die übereinander gelagerten Schichten ungestört ruhen und die Schichtung verschärft sich noch. Wenn dagegen jene modifizierenden Einflüsse dahin arbeiten, den Sinn der Schichtung umzukehren, also z. B. an Stelle der direkten die verkehrte Temperaturschichtung oder umgekehrt zu setzen, so bilden sich thermische Convektionsströme, die eine vollständige Aufhebung der Schichtung zur Folge haben.

Diese beiden Vorgänge, die Verschärfung wie die Vernichtung der Temperaturschichtung, sind anfänglich immer lokalisiert und auf gewisse Schichtkomplexe des Wassers beschränkt. Allgemein werden sie nur, wenn die umgestaltende thermische Einwirkung längere Zeit andauert.

Die Verschärfung der thermischen Stratifikation wird bei warmen Gewässern während der Zeit der Erwärmung und zwar durch Wärmegewinn, bei kalten Ge-

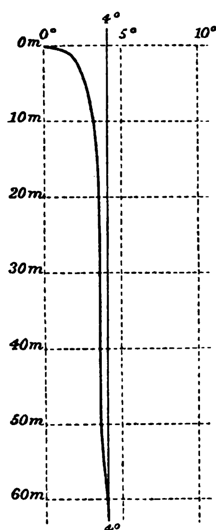


Fig. 10. Temperaterschichtung in kalten Gewässern.

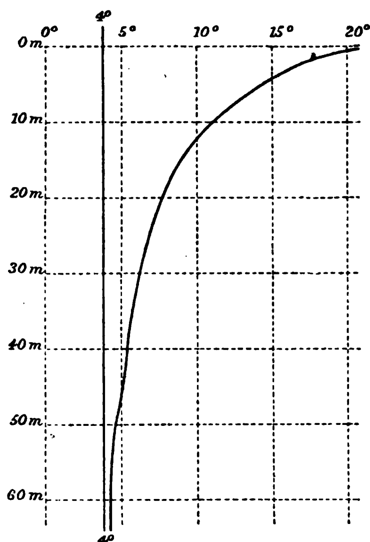


Fig. 11. Temperaturschichtung in warmen Gewässern.

wässern in der Zeit der Abkühlung und zwar durch Wärmeverlust von der Oberfläche aus herbeigeführt. Dabei ist die Schichtung in den Oberflächenschichten viel schärfer ausgeprägt als in der Tiefe, die Temperaturänderung mit der Tiefe also in den oberen Schichten relativ sehr bedeutend; sie nimmt nach den tieferen Schichten zu rasch ab und verschwindet schließlich in den untersten vollständig. Die Figuren 10 u. 11 stellen

die Temperaturänderung mit der Tiefe graphisch dar; als Ordinaten sind die Tiefen, als Abscissen die Temperaturgrade abgetragen. Wenn hingegen die Wassermasse im Zustand der Ausgleichung der vertikalen Temperaturdifferenzen begriffen ist (Erwärmung kalter, Abkühlung warmer Gewässer), so wird die Schichtung in den oberen Schichten aufgehoben. Die homotherme Schicht (Schicht von gleicher Temperatur) wird immer dicker; Tempe-

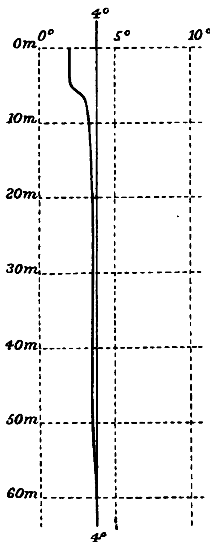


Fig. 12. Bis zu einer Tiefe von 7 m vorgeschrittene Temperaturausgleichung in kalten Gewässern.

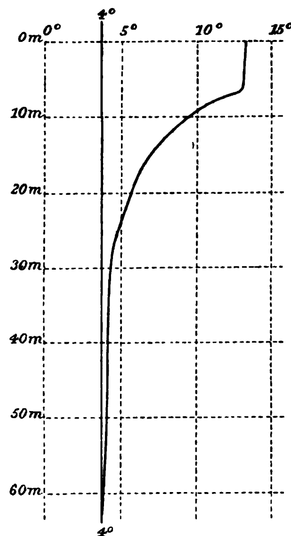


Fig. 13. Bis zu einer Tiefe von 8 m vorgeschrittene Temperaturausgleichung in warmen Gewässern.

raturschichtung ist nur in den tieferen, von den Ausgleichsströmungen noch nicht betroffenen Schichten vorhanden. Den thermischen Zustand eines Sees, der sich in einer Ausgleichungsphase befindet, stellen Fig. 12 u. 13 graphisch dar.

Je länger eine thermische Einwirkung andauert, desto deutlicher tritt ihr Einfluß hervor, in desto tieferen Schichten macht er sich fühlbar. Wäre die Dauer der

Einwirkung unbegrenzt lang, so würde er sich bis in die größten Tiefen auch der tiefsten Seen bemerkbar machen. In Wirklichkeit ist das aber nicht der Fall. Abkühlungs- und Erwärmungsvorgänge wechseln miteinander ab. Sie werden durch die tägliche Periode unterbrochen; aber auch unperiodische Schwankungen von Tag zu Tag treten auf, in der warmen Jahreszeit als Kälteperioden, in der kalten als Wärmeperioden. Da der Wechsel von Er-

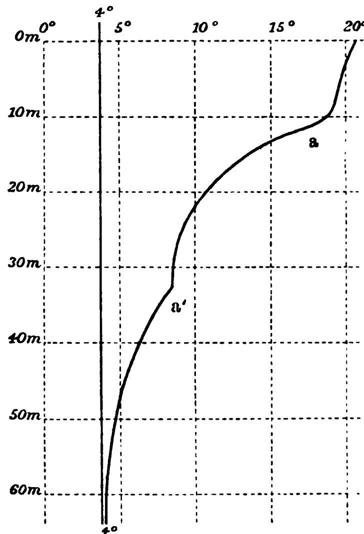


Fig. 14. Uebereinanderlagernde thermisch ausgeglichene und thermisch geschichtete Wassermassen in einem warmen See.

wärmung und Abkühlung von den zum Teil regelmäßig periodisch, zum Teil aber auch unregelmäßig aperiodisch auftretenden Witterungsvorgängen abhängig ist, so ist die Kurve, die die vertikale Temperaturänderung im See zeigt, oft sehr kompliziert; es zeigen sich meist übereinander gelagerte Spuren alternierender Ausgleichungs- und Schichtungsvorgänge. Nach Ed. Richters[1]) Vor-

[1]) Richter, Die Temperaturverhältnisse der Alpenseen. IX. deutscher Geographentag. Wien 1891.

gang nennt man diejenige Schicht, in der die Stratifikation plötzlich ihren Habitus ändert, Sprungschicht. In der Sprungschicht sind die Temperaturunterschiede der einzelnen Schichten sehr groß. Die Sprungschicht kann sich in jeder beliebigen Tiefe befinden, desgleichen können verschiedene „Sprünge" in verschiedenen Schichten desselben Temperaturprofils auftreten. (a a' in Fig. 14.)

Es ist von Wichtigkeit zu ermitteln, bis in welche Tiefe während einer bestimmten Zeitdauer der Abkühlung oder der Erwärmung die thermische Einwirkung sich bemerkbar macht, mag diese Zeitdauer ein Stück der täglichen, der jährlichen, oder der cyklischen Periode sein. Während der Verschärfung der thermischen Stratifikation ist diese untere Grenze nur schwierig zu ermitteln. Die Wärme dringt in die tiefen Schichten so langsam und in so geringen Beträgen ein, daß diese Grenze nur durch oft wiederholte sehr genaue thermometrische Messungen bestimmt werden kann. Befindet sich das Wasser dagegen im Zustand der thermischen Ausgleichung, so gibt die leicht bestimmbare Sprungschicht genau die Grenze an, bis zu der die Ausgleichung fortgeschritten ist, d. h. bis zu der die thermische Einwirkung sich geltend gemacht hat.

Der wichtigste thermische Einfluß, der auf eine Erwärmung hin arbeitet, ist die Sonnenstrahlung, derjenige, der auf eine Abkühlung hin arbeitet, die Ausstrahlung in die Atmosphäre und in den Weltenraum. Die gesamte Leistung beider Einflüsse hängt von der Dauer ihrer Wirkung und von der Diathermanität der Luft und des Wassers ab. Je reiner das Wasser in physikalischer Beziehung ist, in desto tiefere Schichten dringen beide vor. Die Wirkung der Sonnenstrahlung hängt ferner von der Sonnenhöhe ab; je größer der Höhenwinkel der Sonne, oder je kleiner der Einfallswinkel der Sonnenstrahlen, d. h. der Winkel zwischen den Strahlen und der Lothrichtung, desto mehr Strahlen dringen ins Wasser ein. Sie hängt des weiteren vom Zustande der Seeoberfläche ab; Wellenschlag vermindert die Zahl der absorbierten Strahlen; bei ganz glattem See werden mehr Strahlen

absorbiert und weniger zurückgeworfen, als bei bewegtem[1]. In den tropischen Gegenden und in den hohen Lagen ist die Intensität der Sonnenstrahlung am größten. Gerade in hohen Lagen und in klaren Nächten des Frühlings ist ebenso die Wärmeausstrahlung am größten.

Die Wirkungsgrenze der thermischen Einflüsse von verschiedener Zeitdauer oder Periode ist bis jetzt nur für Seen der gemäßigten Gegenden bekannt. Die Erscheinungen sind zu verwickelt, als daß wir aus dem Verhalten der Seen der gemäßigten Zonen ohne weiteres auf das der tropischen und der polaren Schlüsse ziehen dürften. Für die temperierten Seen können folgende Werte gelten: Grenze des Einflusses der täglichen Periode bei 5—15 m Tiefe, Grenze des Einflusses der jährlichen Periode bei 100—150 m Tiefe.

Ueber das Eindringen der cyklischen Temperaturschwankungen, die sich in allgemeinen Schwankungen des Klimas äußern und zwar wahrscheinlich in der Brücknerschen Klimaperiode von ungefähr 35 Jahren, läßt sich etwa folgendes sagen: Die Temperatur der tiefen Schichten der gemäßigten Seen wird durch die mit den Jahreszeiten wechselnde Erwärmung und Abkühlung des Wassers alljährlich zweimal auf 4° gebracht. Folglich können Serien kalter oder warmer Jahre in der Temperatur der tiefen Schichten nicht zum Ausdruck kommen. Cyklische Schwankungen der Temperatur großer Tiefen kommen nur in polaren und tropischen Seen vor, sowie vielleicht in einigen temperierten Seen, die in Grenzregionen liegen und daher in einzelnen Jahren dem Typus der tropischen bezw. polaren Seen folgen. Ich habe solche Seen subpolare und subtropische Seen genannt.

So kann es als Folge einer Reihe gemäßigter Winter vorkommen, daß das Wasser eines subtropischen Sees sich nicht bis auf 4° abkühlt. Die bis auf den Grund eingedrungene sommerliche Wärme hat in diesen Fällen das Wasser der tiefen Schichten auf etwas über 4° ge-

[1] Vergl. Ch. Soret, Archives de Genève IV. 461. 1897.

bracht. Das Umgekehrte findet bei den subpolaren Seen statt.

Was die rein polaren oder tropischen Seen anbelangt, so liegen keine Gründe vor, eine untere Grenze für die Einwirkung der cyklischen thermischen Einwirkungen anzunehmen. Die großen Tiefen der tropischen Seen werden in einem heißen Sommer etwas wärmer. Folgt darauf ein milder Winter, so findet keine Abkühlung dieser tiefen Schichten statt. Diese tritt erst während eines strengen Winters ein. Warme Sommer bedingen also eine kleine Steigerung der Tiefentemperaturen; milde Winter modifizieren sie nicht, strenge Winter sind hingegen von raschem und mächtigem Einfluß.

Wenn die Witterungsanomalie eine Aufhebung der Schichtung bewirkt, also eine Abkühlung bei tropischen, eine Erwärmung bei polaren Seen, so ist die Aenderung stets plötzlich und kann sich innerhalb weniger Tage gegen Schluß des betreffenden Zeitraumes vollziehen. Führt die Witterungsanomalie hingegen zu einer Verschärfung der Schichtung (Erwärmung tropischer, Abkühlung polarer Seen), so dringt deren Wirkung nur langsam und schrittweise in die Tiefe vor. Sie macht sich nur durch eine geringe, während der ganzen Wirkungsdauer sich vollziehende Aenderung der Temperatur geltend.

Unter Zugrundelegung unserer obigen Ausführungen erhalten wir für die Tiefentemperatur der Seen folgende normale Werte [1]), denen wir noch die zufälligen beifügen:

		Tiefentemperatur normal	Tiefentemperatur zufällig
Tropische Seen,	typische	$> 4^0$	—
„ „	subtemperierte	$> 4^0$	4^0
Temperierte „	subtropische	4^0	> 4
„ „	typische	4^0	—
„ „	subpolare	4^0	$< 4^0$
Polare „	subtemperierte	< 4	4^0
„ „	typische	< 4	—

1) Angenommen ist, daß die Tiefe des Sees bedeutend ist.

Wir erwähnten oben, daß die thermischen Einwirkungen sich bis in die größten Tiefen bemerkbar machen können und haben nunmehr den Beweis dafür zu leisten. Nehmen wir als Beispiel einen subtemperierten tropischen See, den Genfer See, dessen Tiefe mehr als 100 Meter beträgt, — so tief liegt die untere Grenze der jährlichen Schwankung. Aus den Beobachtungen ergibt sich direkt, daß sich die tiefsten Schichten dieses Sees im Laufe eines Jahres um 0,1, 0,2 oder sogar 0,3° erwärmen oder abkühlen. Welchen Ursachen sind diese Schwankungen der Temperatur der Tiefe zuzuschreiben?

a) Vielleicht der Wärmeleitung? Diese Einwirkung ist gleich Null. Durch Leitung dringt die Wärme in einem Jahr kaum tiefer als 6 m ein.

b) Der Sonnenstrahlung? Auch diese Wirkung ist sehr gering anzuschlagen. Die Diathermanität des Wassers erlaubt nur sehr kleinen Wärmemengen weiter als einige Meter oder Dekameter tief einzudringen.

c) Auch die Wirkung der Eigenwärme der Erde ist sehr gering; sie würde nur im stande sein, eine 100 m mächtige Wasserschicht in einem Jahr um 0,004° zu erwärmen.

d) Der Einfluß der mechanischen Convektion, die durch die vom Wind bedingten Strömungen hervorgebracht wird, ist jedenfalls bedeutender. Der Gegenstrom eines starken Windes sinkt an der windgetroffenen Küste in die Tiefe, bis er auf eine Wasserschicht stößt, die die gleiche Dichte besitzt. Beide Wassermassen mischen sich mechanisch. Unter geeigneten Umständen tritt dann eine Erwärmung der tiefen Schichten ein. Wenn die thermische Schichtung nur schwach entwickelt ist und die Dichteunterschiede zwischen den einzelnen Schichten unbedeutend sind, so kann der Gegenstrom in größere Tiefen hinabsinken. Allein, in diesem Falle sind auch die Temperaturunterschiede zwischen den oberen und den unteren Schichten unbedeutend und die Mischung ihrer Wassermassen wird nur eine geringe Erhöhung der Temperatur der Tiefe zur Folge haben. Sind die Temperaturunterschiede beträchtlich, so sind es auch die Dichte-

unterschiede. Der Gegenstrom kann daher dann nicht in tiefe Schichten hinabdringen.

e) Der wichtigste Faktor für die Aenderungen der Tiefentemperatur sind jedenfalls die hydrostatischen Ausgleichsströmungen trüber Gewässer. Die mit Schwebestoffen beladenen Wassermassen der Zuflüsse, die durch Küstenbrandung getrübten littoralen Gewässer können eine größere Dichte besitzen als diejenige der Tiefenregion des Sees. Sie können infolgedessen bis auf den Grund des Sees sinken. Noch bevor sie sich dort ihrer Schwebestoffe durch Ablagerung entledigt haben, was sehr langsam erfolgt, setzen sie sich mit den umgebenden Wassermassen in ein thermisches Gleichgewicht: die tiefen Schichten des Sees haben sich erwärmt. Der Temperaturunterschied zwischen dem Oberflächenwasser und demjenigen der großen Tiefen kann sehr bedeutend sein. Im Genfer See haben die tiefen Schichten eine Temperatur von 4—5°. Das Wasser des Hauptzuflusses, der Rhone, hat im Sommer 10—15°, das Wasser der littoralen Region 15—25° C. Die Erwärmung der tiefen Schichten durch das untersinkende Oberflächenwasser kann daher sehr beträchtlich sein und sich auch in den größten Tiefen bis auf den Grund des Sees bemerkbar machen.

Diese Erscheinungen treten speziell bei tropischen Seen auf. In polaren Seen liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt, mit folgenden Abweichungen: Die Wirkung der Strahlung ist negativ, d. h. sie ergibt einen Wärmeverlust, weil die Ausstrahlung in den Weltenraum größer ist, als die Sonnenstrahlung. Die Intensität der Ausstrahlung ist in der Richtung zum Zenith am größten, während die Intensität der Sonnenstrahlung, die von der Höhe des Gestirnes über dem Horizont abhängt, bei dem niedrigen Stand der Sonne sehr klein ist. Die Eigenwärme der Erde wirkt dieser Abkühlung entgegen, aber nur in minimalem Grade.

Wie wir gesehen haben, herrscht in gewissen Seen, den tropischen, beständig direkte, in anderen, den polaren, beständig verkehrte thermische Schichtung, während in den temperierten Seen beide Schichtungstypen zeitlich

miteinander abwechseln: Im Sommer herrscht direkte, im Winter verkehrte Schichtung. Wir haben nun noch eine eigentümliche Erscheinung zu behandeln, die bis jetzt nur in subtemperierten tropischen Seen, so im Genfer See, im Ceresio etc., beobachtet worden ist: das gleichzeitige Nebeneinanderauftreten der direkten und der verkehrten Schichtung.

Der Genfer See gehört den tropischen Seen an. Sein Hauptkörper, die Wassermasse der pelagischen Region, hat im Winter eine Temperatur über 4°, je nach den Jahren 4,5 bis 5,5°. In Teilen der littoralen Region hingegen und besonders in dem schmalen seichten, „Petit Lac“ genannten Teil des Sees kommt es hie und da in

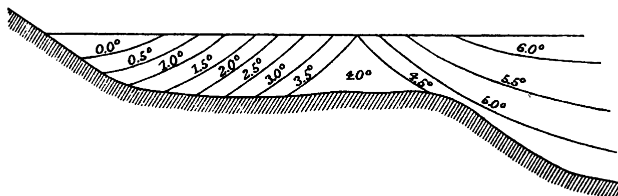


Fig. 15. Schema der thermischen Barre auf der Uferbank.

strengen Wintern zur Bildung von Eis, sei es unmittelbar am Ufer, sei es in der Uferregion. Die Temperatur sinkt hier lokal unter 4°, ja bis auf 0°. Das warme Wasser des offenen Sees und das kalte Wasser der Uferregion stehen also an der Oberfläche in seitlicher Berührung. Dementsprechend zeigt die pelagische Region direkte, die littorale aber verkehrte thermische Schichtung. Die ganze Erscheinung wird durch obenstehendes Schema verständlich (Fig. 15). Wir nennen die Linie, in der das Wasser von 4° bis zur Oberfläche reicht, thermische Barre. Diese thermische Barre wird fortwährend zerstört, indem das schwere Wasser von 4° in die Tiefe sinkt; sie bildet sich aber zugleich fortwährend neu, weil sich das zum Ufer hin gelegene kalte Wasser unter 4° immerfort mit dem zum offenen See hin gelegenen warmen

Wasser mischt. Die thermische Barre verharrt so in einer ziemlich beständigen Stellung.

In Wirklichkeit ist sie eine senkrechte Ebene. Ich habe sie jedoch der größeren Deutlichkeit halber in der Figur als einen an der Oberfläche ausgehenden Rücken dargestellt, der von geneigten, beiderseits abfallenden Flächen begrenzt ist.

Die umgekehrten Verhältnisse müssen in den subtemperierten polaren Seen vorkommen und zwar im Frühling während der ersten Erwärmungsperiode. Die Temperatur der littoralen Zone steigt dann rascher als diejenige der kaltbleibenden pelagischen Region. Beispiele dafür sind bis jetzt noch nicht bekannt geworden.

5. Gefrieren der Seen.

Die Wassermasse eines Sees bleibt, als Gesamtheit betrachtet, bei fortschreitender Erwärmung stets flüssig, behält also ihren Aggregatzustand bei; niemals erreicht sie die Temperatur des labilen Gleichgewichtes von 100°, bei der sie in Dampf übergehen würde [1]). Anders bei Abkühlung; da kann die Temperatur der Wassermasse bis zum und unter den Gefrierpunkt fallen, so daß das Wasser in den festen Aggregatzustand übergeführt wird, d. h. sich in Eis umwandelt. Der See gefriert. Sowohl polare als auch temperierte Seen gefrieren mehr oder weniger häufig, ja auch bei tropischen subtemperierten Seen kommt, wie wir soeben ausgeführt haben, ein lokales Gefrieren vor.

Hat sich in einem See oder auch nur in einem Teil desselben, der von der pelagischen Region durch eine thermische Barre getrennt ist, die verkehrte Temperaturschichtung eingestellt, so kann bei andauernder Kälte die Temperatur der Oberfläche auf 0° sinken. Weitere Wärmeverluste führen alsdann zur Bildung von Eiskrystallen. Wir unterscheiden beim Gefrieren mehrere Phasen: erstens die einleitende Periode, in der das Gefrieren sich vorbereitet, zweitens das eigentliche Zufrieren

---

[1]) In thätigen Vulkangebieten kommen vereinzelt Seen mit Temperaturen vor, die dem Siedepunkt sehr nahe liegen.

und den Zustand des Gefrorenseins und drittens das Auftauen.

Erste Phase: Die einleitende Periode. Das Gefrieren eines Sees kann nach zwei ganz verschiedenen Typen geschehen.

Typus A. Allgemeines Zufrieren durch lamellare Eisbildung findet statt, wenn der See ruhig ist. Ist die Temperatur der Seeoberfläche auf 0^0 gesunken, so bedeckt sie sich beim ersten weiteren, starken und plötzlichen Wärmeentzug, zum Beispiel in einer klaren Winternacht, während deren eine starke Wärmeausstrahlung stattfindet, mit einer gleichmäßigen, durchsichtigen, dünnen, kontinuierlichen Platte von Eis, die allmählich an Dicke zunimmt. In einer Nacht kann sich die ganze Oberfläche eines Sees mit einer solchen dünnen Eisschicht überkleiden. Ist am Tage nach diesem ersten Einfrieren die Sonnenwärme nicht stark genug, um die dünne Eisschicht zu schmelzen, so verdickt sich diese in der folgenden kalten Nacht, indem sich an ihrer unteren Seite neues Eis ansetzt. Der See ist alsdann definitiv zugefroren.

Typus B. Bei Wellenschlag findet lokales Gefrieren durch Schollenbildung statt. Es bilden sich dann, und zwar in gleicher Weise auf der Oberfläche des Meeres wie der Flüsse und der Seen, eigentümlich gestaltete Eismassen, die wir nach dem englischen Wort *Pan-cake* (französisch *glaçons-gâteaux*) als kuchenförmige Eisschollen bezeichnen. Die zuerst gebildeten, von den Wellen hin und her geworfenen Eisnadeln vereinigen sich zu rundlichen Schollen, die anfangs nur einige Centimeter Durchmesser haben. Von den Wellen hin und her bewegt, prallen sie fortwährend aneinander, ohne miteinander zu verschmelzen. Jede einzelne dieser zuerst mehr lockeren Schollen wächst und entwickelt sich selbständig. Durch das fortwährende Aufeinanderstoßen, durch die andauernde Reibung werden ihre Kanten abgeschliffen; die Kreisform wird immer vollkommener. Die dabei losgelösten Eistrümmer, ebenso wie neugebildete Eisnadeln werden durch die Wellenbewegung auf den

Rand der Scholle geworfen und gefrieren dort, indem sie am Rand der letzteren einen schwammigen, blendendweißen, kreisrunden Wall bilden. Infolgedessen nimmt das Gewicht der Scholle zu, sie sinkt etwas tiefer ein, so daß ihre ganze Oberfläche mit einer wenn auch dünnen Wasserschicht bedeckt ist. Diese Wasserschicht schaukelt mit der ihr als Unterlage dienenden Scholle und schlägt dabei an den Innenrand des geschilderten Walles an, so daß dieser fortwährend gegen die Peripherie der Scholle gedrängt wird. Wie stark die Scholle auch an Umfang zunehmen mag, der Wall bleibt immer randständig. Bei andauernder Kälte wächst die Scholle nach allen Richtungen. An ihrer unteren Seite wächst sie wie jede in Wasser von 0^{0} eintauchende Eismasse durch Ankrystallisieren von Eis, an den seitlichen Rändern fügen sich neue Eisnadeln an, so weit sie nicht zwischen den einzelnen Schollen zermalmt werden; an der oberen Seite gefriert das Wasser, das die halb untergetauchte Scholle bedeckt. Dieser komplizierte Vorgang des Wachsens des Eises ist, wie man sieht, ganz verschieden von dem einfachen Wachsen des Eises beim Gefrieren nach dem zuerst betrachteten Typus A, wobei sich nur an der Unterseite der Lamelle Eis ansetzt. Die Eisscholle gewinnt schließlich die Gestalt einer plankonvexen Linse, deren untere Fläche konvex ist, während die obere vom kleinen Randwall umgrenzte Seite flach bleibt. Die ganze Scholle besteht aus schwammigen, zerbrechlichen übereinandergeschichteten Eislamellen. Sie kann einen Durchmesser von einem Meter und mehr erreichen.

Die Schollen wachsen in dieser Weise weiter, so lange die Kälte anhält und das Wasser bewegt ist. Tritt Windstille ein und glättet sich der See, so frieren die Schollen zusammen und das weitere Gefrieren vollzieht sich durch Eisansatz wie beim Gefrieren nach dem Typus A.

Zweite Phase: Das definitive Zufrieren. Nach der endgültigen Bildung der primären Eiskruste verdickt sich diese durch Ansatz neuer Schichten an der Unterseite. Das anfänglich rasche Dickenwachstum verlang-

samt sich aber bald, da das thermische Leitungsvermögen des Eises gering ist[1]). Die Temperatur der Oberfläche der Eisschicht ist durch die unmittelbare Berührung mit der kalten Luft, durch Verdunstung und durch Ausstrahlung bestimmt. Die unteren Eisschichten hingegen sind mit Wasser in Berührung, dessen Temperatur nur wenige zehntel Grade über Null liegt.

Die ausgebildete Eisschicht, die den See deckt, zeigt verschiedene interessante Erscheinungen.

a) Die Spaltenbildung oder das Bersten des Eises wird durch die Kontraktion des Eises veranlaßt, das sich während seines Dickenwachstums bedeutend unter Null abkühlen kann. Die Spalten, die das Eis in seiner ganzen Dicke senkrecht durchsetzen, verlaufen geradlinig oder schwach gekrümmt. Man kann sie oft Hunderte, ja Tausende von Metern weit verfolgen. Sie schneiden sich oft unter verschiedenen Winkeln, so daß das ganze Eisfeld in große Schollen zerlegt wird. Im Moment des Berstens vernimmt man oft auf große Entfernungen hin ein donnerartiges Krachen.

b) Die sich regelmäßig einstellenden seitlichen Pressungen werden durch das Wechselspiel der nächtlichen Abkühlung und der tagsüber stattfindenden Erwärmung bedingt. In der Nacht zieht sich das Eis infolge der Abkühlung zusammen. Die Spalten, die die einzelnen Schollen trennen, werden breiter. Das Wasser steigt zwischen den Wänden der Spalten empor, gefriert hier und bildet so zwischen den alten Eismassen ein Kissen von neuem Eis. Tagsüber steigt die Temperatur, die Eisschollen dehnen sich wieder aus und nehmen ihre früheren Dimensionen an. Die neugebildeten Eispolster verhindern aber, daß sich die Ränder der Schollen in gleichem Maße wie früher nähern und die Spalten sich schließen. So entsteht von Scholle zu Scholle ein seitlicher Druck, der sehr bedeutend werden kann. Auf ganz zugefrorenen Seen kann sich das Eis dabei auf den Strand emporschieben. In der Mitte des Sees schiebt es sich zu kleinen Rücken zusammen.

[1]) Vergl. Weber. Oben S. 104 zitiert.

Wo der seitliche Druck zwei Schollen aneinanderpreßt, da weichen die Lippen der Spalten aus, richten sich aneinander empor und können geradezu vollständig überkippt werden. Das Eis türmt sich empor und bildet eine unregelmäßige Masse, die die freie Bewegung des Schlittschuhläufers auf dem See hindert. Diese aus Spalten mit emporgepreßten Lippen entstehenden Rücken bilden sich jedes Jahr ungefähr an denselben Stellen wieder, so daß die betreffenden Stellen an manchen Seen besondere Namen erhalten haben.

Die Spalten- und Rückenbildung dauert so lange, als die Kälte anhält und das in direktem Kontakt mit der Luft stehende Eis an Dicke zunimmt. Sie hört auf, sobald Schnee gefallen ist, der das Eis gegen die täglichen Schwankungen der Temperatur schützt.

c) Veränderung der Struktur des Eises. Unter dem Einfluß der Kälte ziehen sich die Oberflächenschichten des Eises zusammen, während die tiefen, mit dem Wasser in Kontakt stehenden Schichten eine Temperatur von 0° behalten. Die Eiskruste sondert sich dadurch in unzählige, vertikal gestellte, unregelmäßige, den Säulen des Basalts vergleichbare Prismen von einem bis zu mehreren Centimeter Dicke. Dieser weitgehenden Zerklüftung ist es zuzuschreiben, daß das Eis am Ende des Winters weit zerbrechlicher ist als zu Anfang der Frostperiode.

d) Während milder Winter, in denen häufige Schwankungen der Temperatur um den Nullpunkt vorkommen, kann man oft beobachten, daß inmitten der den ganzen See bedeckenden Eisdecke Wasserlöcher offen bleiben. Während die Eisdecke im ganzen See an Dicke zunimmt, gefriert das Wasser an diesen offenen Stellen sehr lange nicht. Das Vorkommen solcher Löcher auf dem Lac de Joux glaube ich durch Anwesenheit großer Scharen von Wildenten erklären zu können, die sich dort regelmäßig niederlassen und durch ihre Bewegungen das Gefrieren des Wassers verhindern. Ob diese Erklärung überall anwendbar ist, mag dahin gestellt bleiben.

Dritte Phase: Das Schwinden der Eisdecke (Auftauen). Sobald die Temperatur über 0° gestiegen ist,

schmilzt das Eis an seiner Oberfläche ab. Gleichzeitig dringt Wärme in das Eis ein, soweit es dessen Durchlässigkeit gestattet, und schmilzt hier das Eiszement, das die erwähnten Eisprismen mit einander verkittet. Das Eis verliert weniger Wärme durch seine Oberfläche, als es empfängt; so steigt die Temperatur des Eises auf 0°. Es wird nunmehr auch von unten von den Wassermassen angegriffen, auf denen es schwimmt, da deren Temperatur infolge von Zuleitung von Wärme von unten und Zustrahlung von Wärme von oben durch das Eis hindurch etwas über 0° steigt. Diese Vorgänge mindern die Dicke des Eises, es wird naß und morsch und zerfällt in Schollen. Sobald freies, offenes Wasser zwischen den einzelnen Schollen auftritt, veranlassen die Winde in den darunter liegenden Wasserschichten Ausgleichsströmungen, die Wasser aus der Tiefe emporschaffen und so die verkehrte thermische Schichtung aufheben. Dadurch kommt relativ warmes Wasser mit dem Eis in Berührung. Der Schmelzprozeß geht nun sehr schnell von statten; die Eisdecke eines Sees kann in wenigen Tagen, ja Stunden verschwinden.

Die Zeit des Gefrierens. Das Gefrieren eines Sees findet erst dann statt, wenn die Oberflächentemperatur auf 0° gesunken ist. Das warme Sommerwasser muß sich bis unter 4° abgekühlt und so zum kalten Winterwasser geworden sein. Erst dann stellt sich die verkehrte thermische Schichtung ein, die das Gefrieren ermöglicht. Das Zufrieren eines Sees, der im Sommer hohe Temperaturen aufweist, erfolgt daher erst spät im Winter. Unter sonst gleichen Verhältnissen tritt die Abkühlung, die das Gefrieren ermöglicht, um so später ein, je tiefer der See ist.

Neben dem normalen winterlichen Gefrieren eines Sees beobachtet man häufig ein Gefrieren im Vorfrühling; dasselbe tritt nach einer kalten klaren Nacht infolge starker Wärmeausstrahlung ein. Diese Erscheinung, die sehr oft auf einen warmen Tag folgt, ist ein deutlicher Beweis für die hohe thermische Durchlässigkeit der Atmosphäre, die infolge der wiederholten winter-

lichen Kondensationen beinahe ihres gesamten Wasserdampfes beraubt ist.

Das Datum des Gefrierens und des Auftauens. Die Aufzeichnung der Zeitpunkte des Gefrierens, d. h. der Bildung der Eisdecke und des Auftauens eines Sees kann nicht genug empfohlen werden. Man erhält so ein wertvolles Material, das sich trefflich zur Vergleichung der Witterungsverhältnisse verschiedener Winter am gleichen Ort, aber auch der klimatischen Verhältnisse verschiedener Gegenden eignet. Speziell für die Charakterisierung strenger und milder Winter sind solche Aufzeichnungen unschätzbar. Auch die Ausdehnung des Gebietes, in dem ein strenger Winter auftritt, läßt sich trefflich an Daten über das Gefrieren und Auftauen des Sees konstatieren.

Einfluß des Zufrierens des Sees auf die Atmosphäre. Die große Menge latenter Wärme, die beim Uebergang des Wassers aus dem flüssigen in den festen Aggregatzustand frei wird, bewirkt eine Milderung der Witterung während der kritischen Zeit des Zufrierens. Umgekehrt wird beim Schmelzen des Eises eine große Menge Wärme gebunden und so der Einzug des Frühlings verzögert. So wirkt die Eisdecke eines Sees dahin, den Herbst zu verlängern und den Frühling hinauszuschieben. Der Winter fängt etwas später an und hört etwas später auf, als es ohne das Gefrieren des Sees der Fall sein würde.

6. Thermische Bilanz.

Aus passend über das Jahr verteilten Serien von thermometrischen Lotungen lassen sich Anhaltspunkte für die Beurteilung des thermischen Einflusses des Sees auf seine Umgebung gewinnen. Man braucht nur die von der Wasserfläche absorbierte und die von derselben abgegebene Wärmemenge zu bestimmen. Die hierbei von mir eingeschlagene Methode ist die folgende:

In den verschiedenen Jahreszeiten werden in der pelagischen Region des Sees Serien von thermometrischen

Lotungen ausgeführt. Durch Interpolation, die mit genügender Genauigkeit ausgeführt werden kann, bestimmt man die Temperatur des Wassers von 10 zu 10 m Tiefe und addiert hierauf diese Temperaturzahlen. Da nun eine vertikale Wassersäule von 1 cm^2 Querschnitt und 10 m Höhe ein Liter Wasser enthält, so stellt diese Summe der Temperaturzahlen die Anzahl von Kalorien dar, die eine Säule des Seewassers von 1 cm^2 Querschnitt über einer Anfangstemperatur von 0^0 aufgespeichert hat. Die Differenz zwischen den aus zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Lotungen sich ergebenden Wärmesummen gibt in Kalorien den Wärmegewinn oder Wärmeverlust an, den die Wassermasse durch einen Quadratcentimeter seiner Oberfläche erlitten hat. Wenn man die Differenz durch die Anzahl der Tage, die zwischen den zwei Lotungen verstrichen sind, dividiert, so erhält man den täglichen Wärmegewinn bezw. Wärmeverlust. Durch eine einfache Multiplikation der erhaltenen Werte läßt sich der Wärmegewinn und Wärmeverlust von einem Quadratmeter oder Quadratkilometer der pelagischen Region, der die Temperaturbeobachtungen entstammen, berechnen. Soweit ist die Rechnung wohl richtig. Will man sie jedoch auf die ganze Oberfläche des Sees ausdehnen, so bedarf sie einer Korrektur, die allerdings nicht ganz genau ist. Die thermischen Verhältnisse der pelagischen und littoralen Region sind nämlich nicht dieselben; es können vielmehr bedeutende Unterschiede auftreten. Die littorale Region genau in Rechnung zu ziehen ist aber fast unmöglich, schon weil ihre Tiefe so wechselt und damit auch ihr thermisches Verhalten sich von Ort zu Ort ändert.

7. Thermische Einwirkung des Sees auf den Fluß, der ihn durchfließt.

Jeder Zufluß hat bei seinem Eintritt in den See eine bestimmte mit der Jahreszeit, aber auch von Fluß zu Fluß wechselnde Temperatur. Die am Grunde des Seebeckens austretenden unterseeischen Quellen besitzen die Temperatur der Gesteinsschichten, die sie zuletzt durch-

flossen haben. Die in der Ebene entspringenden Zuflüsse werden im Sommer durch die Sonnenwärme stark erwärmt und kühlen sich im Winter durch Berührung mit der kalten Luft und vor allem durch Strahlung stark ab. Die vom Schmelzwasser der Schneefelder und Gletscher genährten Zuflüsse erwärmen sich zwar im Sommer etwas auf ihrem Weg vom Gletscher zum See; ihr Wasser bleibt jedoch, wenn der zurückgelegte Weg nicht sehr lang ist, relativ kalt. So hat jeder Zufluß seine bestimmte Temperatur. Je nach seiner Dichte, die von der Temperatur, der chemischen Zusammensetzung und der Menge suspendierter fester Stoffe abhängt, breitet sich das Wasser des Zuflusses an der Oberfläche des Sees aus oder sinkt zur Tiefe, entweder in die mittleren Schichten oder bis auf den Grund hinab. Die Wassermassen der verschiedenen Zuflüsse mischen sich thermisch mit dem umgebenden Seewasser, statt sich direkt miteinander zu mischen, wie es bei Abwesenheit des Sees der Fall wäre.

Der Abfluß des Sees dagegen, der als unmittelbare Fortsetzung der Zuflüsse zu betrachten ist, erfolgt in den meisten Fällen durch einen Kanal, der nur Wasser der Oberfläche des Sees führt[1]). Er ist daher im Sommer warm, im Winter kalt. Was auch die relative Größe der einzelnen Zuflüsse sein mag, ihre Temperatur beeinflußt diejenige des Abflusses nicht mehr; es hängt diese nur von der Temperatur des Sees ab. Nachdem der Fluß den See durchströmt hat, zeigt er die Temperatur der oberen Schichten des Seewassers und nicht die Temperatur, die dem Mittel der Temperaturen der einzelnen Zuflüsse entsprechen würde. Das gleiche gilt auch für unterirdische Abflüsse, mit dem einzigen Unterschied, daß hier die Temperatur des abfließenden Wassers nicht derjenigen des Oberflächenwassers des Sees entspricht, sondern derjenigen der Schicht, aus welcher der Abfluß entspringt.

---

[1]) Nur wenn ein heftiger Wind seeaufwärts weht, d. h. wenn der Austritt des Abflusses an der windgeschützten Küste liegt, wird das Oberflächenwasser von der Mündung weg in den See hinausgetrieben. Die mittleren Wasserschichten steigen am unteren Ende des Sees an die Oberfläche und werden durch den Abfluß entführt.

V. Kapitel.

Optik.

Die optischen Erscheinungen, die auf den See Bezug haben, sind höchst mannigfach und komplexer Art. In folgendem sollen nur die wichtigsten derselben behandelt werden, nämlich:

1. die Durchsichtigkeit des Wassers und die Erscheinungen, die sich an das Eindringen des Lichtes in das Wasser knüpfen;
2. die Farbe des Wassers;
3. die Reflexionserscheinungen;
4. die Refraktionserscheinungen an der Oberfläche des Wassers.

1. Eindringen des Lichtes in das Wasser, Durchsichtigkeit.

Das Wasser ist nicht vollständig durchsichtig, so rein es auch sein mag. Zwei verschiedene Vorgänge halten die Lichtstrahlen auf, die Absorption und die Occultation.

Die Absorption löscht die Schwingungen der Lichtwellen bei ihrem Eindringen ins Wasser allmählich aus. Heinrich Wild, ehemals in Bern, später in St. Petersburg, hat im Jahre 1868 den Absorptionskoeffizienten des reinen Wassers bestimmt[1]). Auf eine Schicht von 1 dm Dicke als Einheit bezogen, fand er bei verschiedenen Temperaturen folgende Transmissionskoeffizienten:

bei 24°	0,91790
„ 17°	0,93968
„ 6,2°	0,94769

Von der Einheit des senkrecht auf die Oberfläche des Wassers einfallenden Lichtes ist also nach dem Passieren einer Schichte von 1 dm Dicke bei einer Wassertemperatur von 24° nur rund 0,92, bei einer Wasser-

[1]) H. Wild, Ueber die Lichtabsorption der Luft. Poggendorffs Annalen. Anhang LXXXIV. 182. Berlin 1868.

temperatur von 6,2° 0,95 vorhanden. Kaltes Wasser ist also durchsichtiger als warmes.

Allein die Durchsichtigkeit ist auch bei kaltem Wasser nicht absolut. Das Licht wird bei seinem Eindringen ins Wasser sehr bald absorbiert und ausgelöscht. Nur ein kleiner Bruchteil des ursprünglich einfallenden Lichtes vermag eine mehrere Meter dicke Schicht Wasser z. B. von 6,2° C. zu durchdringen. Diese Mengen sind: bei einer Mächtigkeit von 6 m 0,04, bei 8 m 0,01 und bei 10 m 0,005 des ursprünglich einfallenden Lichtes.

An der Grenze von Schichten verschiedener Temperatur wird ein Teil des Lichtes gebrochen, ein anderer Teil ausgelöscht oder zerstreut. In Seen, in denen sich das Brechungsvermögen der übereinander liegenden Schichten nur ganz allmählich ändert, ist diese Wirkung jedenfalls gering.

Als Occultation bezeichne ich die Hemmung des Eindringens des Lichtes durch undurchsichtige im Wasser schwebende Körper, an denen Reflexion oder Absorption der Lichtstrahlen erfolgt. Die im Wasser suspendierten festen Partikel bilden gleichsam kleine Lichtschirme, von denen jeder für sich die Fortpflanzung der Lichtwellen hindert. Sind sie zahlreich, so bilden sie gleichsam einen Nebel, dessen Dichte und Mächtigkeit derart sein kann, daß er für Lichtstrahlen absolut undurchdringlich ist.

Das in das Wasser des Sees eindringende Licht stammt von den Gestirnen. Entweder kommt es direkt von der Sonne oder von den Sternen, oder es ist durch den Mond, die Atmosphäre, die vorspringenden Punkte des umgebenden Landes reflektiert. Alle diese verschiedenen Lichtquellen entsenden Strahlen, deren Einfallswinkel von dem Höhenwinkel des aussendenden Objektes abhängt. Ein Teil des einfallenden Lichtes wird von der spiegelnden Oberfläche des Sees zurückgeworfen; ein anderer wird beim Eindringen in das Wasser gebrochen, ein anderer unbedeutender Teil wird beim Uebergang in das dichtere Medium ausgelöscht.

Je höher die Lichtquelle über dem Horizonte steht, desto mehr Licht dringt in das Wasser ein. Senkrecht

einfallende Strahlen werden fast gar nicht zurückgeworfen, nahezu wagerecht einfallende hingegen total reflektiert.

Wie bei den Wärmestrahlen (siehe oben S. 119), so hängt auch bei den Lichtstrahlen die Menge der eindringenden Strahlen in hohem Maße vom Zustand der Wasseroberfläche ab. Ist der See ruhig, so ist der Einfallswinkel überall gleich, die getroffene Fläche einheitlich und glatt. Auf einer von Wellen verschiedener Größe und Richtung bewegten Seeoberfläche dagegen trifft das einfallende Licht auf ungezählte, verschieden steil gestellte Flächen. Auf einem ruhigen See ist daher die Menge des reflektierten Lichtes kleiner, die Menge des gebrochenen Lichtes größer als auf einem bewegten See. Bei bewegter Oberfläche ist daher das Innere des Sees weniger hell erleuchtet, als bei glatter [1]).

Die von einem Gestirn ausgehenden Lichtstrahlen, die nicht von der spiegelnden Oberfläche des Wassers zurückgeworfen werden, werden gebrochen, dringen in das Wasser ein und erleuchten es.

Wie wirkt nun dieses Licht und was wird aus ihm? Wäre das Wasser des Sees physikalisch rein und ganz durchsichtig, so würden die Lichtstrahlen in der ihnen durch die Brechung gegebenen Richtung weiterdringen; sie würden nur allmählich durch Absorption des Wassers ausgelöscht werden; die Intensität des Lichtes würde daher beim Eindringen in tiefere Schichten allmählich abnehmen. In einer bestimmten Tiefe würde praktisch alles Licht ausgelöscht sein. Diese Tiefe nennen wir die Grenze der absoluten Dunkelheit. Da das Absorptionsvermögen des Wassers für Lichtwellen verschiedener Länge sehr verschieden ist, so wird die Grenze der absoluten Dunkelheit für jede Wellenlänge, d. h. für jede Farbe des Spektrums, eine andere sein; das blaue Licht dringt am tiefsten ein, das rote am wenigsten tief. Ist ein See nur tief genug, so dringt kein einziger Lichtstrahl bis auf den Grund. Der Grund erscheint schwarz. Ebenso muß wegen seiner Durchsichtigkeit das auf ihm

---

1) Ch. Soret in Archives de Genève IV. 461. 1897.

ruhende Wasser schwarz erscheinen, wenn es physikalisch rein ist.

Ein in physikalisch reinem Wasser untersinkender Gegenstand wird so lange sichtbar bleiben, als er noch so viel Licht empfängt, daß die von ihm zurückgeworfenen Strahlen auf ihrem Rückweg durch das Wasser zur Oberfläche nicht völlig vom Wasser absorbiert werden und zu einem Teil zum Auge des Beobachters gelangen. Das Bild des Gegenstandes, seine Umrisse bleiben vollkommen scharf. Sobald das Bild des sinkenden Gegenstandes dem Auge entschwindet, ist derselbe an der Sichtbarkeitsgrenze angelangt.

Physikalisch reines Wasser gibt es jedoch in der Natur nicht. Jedes Wasser enthält schwebende Stäubchen, lebende oder tote organische Bestandteile, anorganischen Staub. Die Stäubchen bilden ebensoviele kleine Schirme, die durch Occultation das Eindringen des Lichtes hemmen und dasselbe diffus nach allen Seiten hin zurückwerfen. Dadurch wird bewirkt:

1. eine schnellere Auslöschung des Lichtes. Die Grenze der absoluten Dunkelheit liegt weniger tief, als es der Fall wäre, wenn das Licht durch völlig reines Wasser absorbiert würde;

2. eine allgemeine Erleuchtung des Wassers durch das diffuse Licht, das von der Oberfläche der suspendierten Stäubchen zurückgeworfen wird;

3. ein Verschwinden des Bildes eines untersinkenden Gegenstandes in relativ geringer Tiefe. Die Sichtbarkeitsgrenze liegt relativ nahe der Oberfläche. Die im Wasser suspendierten Stäubchen wirken genau wie die in der Luft suspendierten Staubteilchen oder wie Nebeltröpfchen: sie mindern die Schärfe der Umrisse der Gegenstände und verdecken dieselben vollständig, sobald sie so dicht übereinander gelagert sind, daß der durch sie gebildete Schirm für die Lichtwellen ganz undurchdringlich ist.

Da das Seewasser stets suspendierte Massen enthält, so hängt die Sichtbarkeitsgrenze wie die Grenze der absoluten Dunkelheit sowohl von der Absorption der Lichtstrahlen im Wasser, als auch von ihrer Occultation ab.

Untersuchen wir nunmehr der Reihe nach die verschiedenen Elemente der Durchsichtigkeit der Seen, nämlich:

a) die Grenze der absoluten Dunkelheit;
b) die Sichtbarkeitsgrenze;
c) die Helligkeit des Wassers.

a) Die Grenze der absoluten Dunkelheit.

Infolge der physiologischen Bedingungen, an die die Atmung des Menschen geknüpft ist, ist es uns unmöglich, in die großen Tiefen der Seen einzudringen. Zur Bestimmung der Grenze der absoluten Dunkelheit, d. h. der äußersten Tiefe, bis zu der das Licht einzudringen vermag, müssen wir daher indirekte Methoden anwenden. Bis jetzt sind folgende Verfahren eingeschlagen worden:

1. Man hat die Grenze der absoluten Dunkelheit für das menschliche Auge bestimmt, und zwar da wir uns nicht selbst in die großen Tiefen begeben können, in horizontaler Richtung. Die von L. Soret[1]) präsidierte Kommission der Genfer physikalischen Gesellschaft hat diesen Weg eingeschlagen. Die Untersuchungen fanden im Genfer See während dunkler Nächte statt. Es wurden Lichtquellen von verschiedener Intensität in das Wasser getaucht und sodann vermittelst eines geneigten Spiegels die horizontale Distanz bestimmt, bei welcher das Licht nicht mehr sichtbar war. Folgendes sind die erhaltenen Maximalwerte:

Lichtquelle	Tag	Grenze der absol. Dunkelheit
Moderateur-Lampe[2])	18. Juli 1884	41,3 m
Edison-Lampe[3])	15. März 1886	50,9 m
Bogenlicht	8. August 1885	88,0 m

Je stärker die Lichtquelle ist, desto weiter entfernt liegt die Grenze der absoluten Dunkelheit. Man kann nun fragen, ob die in horizontaler Richtung erhaltenen

---

1) Recherches sur la transparence des eaux du Léman. Mém. Soc. phys. Genève XXIX. Nr. 11. 1887.
2) Mit vegetabilischem Oel.
3) 7 Kerzen.

Werte auch für die vertikale Richtung gelten. Es wäre möglich, daß die oberen Schichten des Wassers mehr organische Staubmassen enthalten als die tiefen. Auch sind die oberen Schichten im Sommer wärmer als die tiefen; sie absorbieren folglich mehr Licht. Diese beiden Faktoren könnten in der That bewirken, daß die Sichtbarkeitsgrenze der Lampe in vertikaler Richtung weiter entfernt liegt, als in horizontaler. Um das klar zu legen, hat die Genfer Kommission am 15. März 1886 die gleichen Untersuchungen in beiden Richtungen an derselben Stelle und mit derselben Edison-Lampe ausgeführt. Das Resultat war folgendes: Grenze der absoluten Dunkelheit in horizontaler Richtung 50,9 m, in vertikaler Richtung 59,8 m. Es ergeben sich also in horizontaler Richtung kleinere Werte. Die Unterschiede sind jedoch nicht beträchtlich. In unserem Fall beträgt die Differenz 15 % des Totalwertes.

2. Grenze der absoluten Dunkelheit für das Sehvermögen der Tiere. Wir haben keinen Grund anzunehmen, daß die Tiere genau dieselben Schwingungen des Lichtes wahrnehmen wie das menschliche Auge; ihr Auge kann sehr wohl anders gestimmt sein als das unserige. Ja, wir wissen sogar durch die Untersuchung von Lord Avebury (Sir John Lubbock), daß die Ameisen gegen ultraviolette Strahlen, die unser Auge nicht wahrnimmt, sehr empfindlich sind; hingegen reagieren sie auf rotes, gelbes und grünes Licht weniger stark. Es ist also möglich, daß die Grenze der absoluten Dunkelheit für die Wassertiere eine andere ist als für den Menschen. Wir müssen daher zur Lösung unserer Frage feststellen, ob in der Tiefe des Sees sich Lebewesen mit Augen und zwar mit normal ausgebildeten Augen finden oder nicht. Ich habe bei meinen Untersuchungen der schweizerischen Seen mit Augen begabte Tiere bis in die größten Tiefen von 300—400 m gefunden. Dagegen hat Dibowsky in den größten Tiefen des Baikalsees Tiere angetroffen, von denen viele doch schon ganz bedeutend veränderte Sehwerkzeuge besaßen. Andererseits treffen wir auch schon in geringeren Tiefen

völlig blinde Tiere. Im Genfer See tritt der blinde Niphargus von 30 m Tiefe, der ebenfalls blinde Asellus Foreli von 70 m Tiefe abwärts auf. Sichere Schlüsse werden sich erst dann ziehen lassen, wenn eine größere Anzahl von Untersuchungen diese scheinbaren Widersprüche erklärt haben werden. Uebrigens haben sich beim Studium der ozeanischen Tiefseefauna ganz entsprechende Widersprüche ergeben.

3. Die untere Grenze der Bildung von vegetabilischen Farbstoffen. Die Chlorophyllfunktion der Pflanzen, d. h. die Reduktion der Kohlensäure, findet nur unter dem Einfluß des Lichtes statt. Die untere Grenze des Vorkommens von grünen Wasserpflanzen kann daher über die Wirksamkeitsgrenze des eindringenden Lichtes Aufschluß geben. Leider sind in dieser Richtung bis jetzt nur wenige Beobachtungen angestellt worden. Im Genfer See z. B. ist die untere Grenze des Vorkommens

a) für Characeen (die Gattungen Chara und Nitella gehen unter den littoralen Pflanzen am tiefsten) 25 m;

b) für Moose (Hypnum Lemani) auf der unterseeischen Moräne von Yvoire 60 m, ein bis jetzt ganz einzig dastehendes Vorkommen;

c) für lebende Diatomeen im Sommer 30 m, im Winter 80 m.

Auch in dieser Hinsicht werden sich sichere Schlüsse erst aus einer größeren Anzahl von Beobachtungen ziehen lassen.

4. Untere Grenze der photographischen Einwirkung des Lichtes. Es gibt für jede lichtempfindliche Substanz eine untere Grenze der photographischen Einwirkung, d. h. eine Grenze, bei der das Licht keine chemischen Veränderungen mehr in der Substanz hervorruft. Bis jetzt erstrecken sich die Versuche nur auf zwei Substanzen.

a) Für Chlorsilber (F. A. Forel) wurde nach einer Expositionsdauer von einem ganzen Tage oder mehr die Grenze der absoluten Dunkelheit bestimmt: Im Genfer See im Sommer zu 45 m, im Winter zu 110 m, im Bodensee im Sommer zu 30 m, im Winter zu weniger als 50 m.

Die erhaltenen Werte zeigen deutlich eine Aenderung nach der Jahreszeit: Im Winter ist die Durchsichtigkeit größer als im Sommer. Die Durchsichtigkeit wechselt jedoch auch von See zu See bedeutend.

b) Für Jod-Bromsilber. Es wurden besonders empfindliche Platten von Monkhoven benutzt. G. Asper fand bei einer Exposition von einem ganzen Tag eine Einwirkung [1])

im Züricher See am 4. August 1881 bis 100 m
im Wallensee am 3. Oktober 1891 bis 140 m.

Fol und Sarasin fanden im Genfer See bei einer Expositionsdauer von 10 Minuten [2])

am	16. August 1884	113 m	schwache	Wirkung
„	16. August 1884	237 „	keine	„
„	23. September 1884	170 „	sehr schwache	„
„	18. März 1885	192 „	„ „	„
„	18. März 1885	235 „	keine	„
„	März 1886	240 „	schwache	„

Da der Versuch vom März 1886 unsicher ist, ergibt sich die Grenze der absoluten Dunkelheit für Jod-Bromsilberplatten zu 200—240 m.

Aus all diesen Thatsachen möchte ich schließen:
Es gibt eine Grenze der absoluten Dunkelheit.
Sie liegt verschieden für jede lichtempfindliche Substanz.
Sie ändert ihre Lage mit der Jahreszeit.
Sie ändert ihre Lage auch von See zu See.

b) Die Sichtbarkeitsgrenze.

Als Sichtbarkeitsgrenze bezeichnet man die Tiefe, bei der ein versinkender, vom Tageslicht beleuchteter Gegenstand dem Auge des Beobachters entschwindet. Die für die Bestimmung dieser Grenze allgemein angewandte Methode besteht darin, daß man eine weiße Scheibe ins Wasser versenkt und bestimmt, bei welcher Tiefe sie

1) G. Asper, Vierteljahrsschrift. Züricher Nat. Ges. XVI. 382. 1881.
2) Pénétration de la lumière du jour dans les eaux du lac de Genève. Mém. Soc. phys. XXIX. Nr. 13. Genf 1887.

verschwindet. Der Einfachheit halber habe ich diese Methode nach dem Namen des Pater A. Secchi[1]) genannt, der sie 1865 mit wissenschaftlicher Genauigkeit im Mittelländischen Meer angewendet hat[2]).

Wie oben ausgeführt, können dem Verschwinden eines beleuchteten Gegenstandes zwei Faktoren zu Grunde liegen: einerseits die Absorption des Lichtes durch das durchsichtige Medium, andererseits die Occultation des Lichtes, die von den kleinen, undurchsichtige Schirme bildenden Staubteilchen im Wasser herrührt. Diese beiden Ursachen müssen in den nach der Scheibenmethode ausgeführten Experimenten aus folgenden Gründen auseinander gehalten werden: Beim Auslöschen des Lichtes durch Absorption bleiben die Umrisse der weißen Scheibe bis zum Augenblicke des Verschwindens scharf. Das Verschwinden tritt nur allmählich ein, der Moment des Verschwindens kann nicht genau bestimmt werden, weil sich die beleuchtete Scheibe beim Untersinken immer mehr verdunkelt. Sie verschwindet vollständig, wenn die Lichtmenge, die sie aussendet, so gering ist, daß sie auf das Auge keine Einwirkung mehr ausübt. Die Sichtbarkeitsgrenze, soweit sie von der Absorption abhängt, variiert daher direkt entsprechend der Intensität der Beleuchtung. — Das Unsichtbarwerden durch Occultation hingegen tritt plötzlich ein. Solange die übereinander gelagerten Staubteilchen, die das Licht auffangen, nicht einen vollständigen Schirm bilden, bleibt das beleuchtete Objekt noch erkennbar. Sobald der Schirm undurchdringlich geworden ist, verschwindet die weiße Scheibe. Die Umrisse des beleuchteten Gegenstandes, die Einzelheiten seiner Struktur verschwimmen progressiv im Staubnebel. Die Intensität der Beleuchtung spielt dabei eine ganz untergeordnete Rolle.

Es entsteht noch die Frage, ob für das Verschwinden eines beleuchteten Gegenstandes noch eine dritte Ursache,

---

[1]) A. Secchi, Esperienze per determinare la trasparenza del mare. In Q. Cialdi, Sul moto ondoso del mare. p. 258. Roma 1866.

[2]) Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß diese Methode schon in den Jahren 1858 - 1860 im Quarnero von Dr. Jos. Lorenz Ritter von Liburnau systematisch angewandt worden ist (Physikalische Verhältnisse und Organismenverteilung im quarnerischen Golf. Sitzungsber. k. k. Akad. Wissensch. Wien 1863.)

die Brechung, geltend gemacht werden kann. Hagenbach hat diesen Punkt schon im Jahre 1870 berührt. Im Jahre 1896 hat W. Spring[1]) gezeigt, daß man in einer Bunsenschen Röhre[2]) die Durchsichtigkeit vollständig aufheben kann, wenn man das darin enthaltene Wasser verschieden erwärmte, so daß Wasserfäden von verschiedener Temperatur durcheinander wirbeln. Die Brechung, die an der Grenze von Schichten verschiedener Dichte eintritt, ist alsdann stark genug, um die vorher bei gleichförmiger Temperatur durchsichtige Wassermasse vollständig undurchsichtig zu machen. Ich frage mich jedoch, ob die Springschen Resultate, so scharfsinnig und gewandt auch die Untersuchungen angestellt wurden, auf die Verhältnisse in einem See mit ruhendem Wasser übertragen werden können. Die Wassermasse eines Sees ist allerdings gewöhnlich thermisch geschichtet; die Schichten befinden sich aber in einem stabilen Gleichgewichtszustand. Sobald dieser Gleichgewichtszustand gestört wird, bilden sich Ausgleichsströmungen im großen und nicht im kleinen; es findet daher keine Mischung von Wasser mit verschiedenem Brechungsvermögen statt, was allein eine totale Auslöschung des Lichtes durch Brechung bewirken könnte. Wenn die Springsche Annahme richtig wäre, nach der die innere Beleuchtung eines Sees auf dem verschiedenen Brechungsvermögen der verschieden temperierten Wassermassen beruhen soll, dann müßte wegen der regelmäßigen thermischen Schichtung die Beleuchtung bei senkrecht einfallenden Strahlen gleich Null sein; sie würde in dem Maße stärker werden, als sich die einfallenden Strahlen von der vertikalen Richtung entfernen würden. Solch bedeutende Unterschiede in der Helligkeit im Wasser sind jedoch in Seen nicht vorhanden. Wir dürfen daher bis auf weiteres die Refraktion als Ursache des Verschwindens eines beleuchteten Körpers außer acht lassen.

Die Tiefe, in der sich die Sichtbarkeitsgrenze be-

---

[1]) Archives de Genève I. 201. 1896.

[2]) Eine lange Metallröhre, deren beide Enden durch Glasplatten geschlossen sind.

findet, ist je nach der Jahreszeit und der Beobachtungsstelle von See zu See verschieden. Folgende Werte mögen die jahreszeitlichen Schwankungen illustrieren:

	Genfer See	Bodensee [1])
Januar . . .	15,5 m	6,6 m
Februar . .	14,7 „	6,5 „
März . . .	13,0 „	6,7 „
April . . .	10,5 „	5,6 „
Mai	8,3 „	5,1 „
Juni	7,4 „	4,8 „
Juli	6,8 „	4,3 „
August . . .	7,1 „	4,4 „
September .	7,5 „	4,1 „
Oktober . .	9,1 „	4,7 „
November . .	10,8 „	4,8 „
Dezember . .	13,7 „	6,7 „

Im Winter ist das Wasser der subalpinen Seen klarer als im Sommer. Ob dies auch für die Seen der anderen Region zutrifft, muß nach dem jetzigen Stand unserer Kenntnisse vorderhand unentschieden bleiben.

Es gibt aber auch regionale Schwankungen der Sichtbarkeitsgrenze in einem See. Wenn wir die Werte für die Sichtbarkeitsgrenze, wie sie in der pelagischen Region der beiden in dieser Richtung bis jetzt untersuchten Seen erhalten worden sind, nach der Lage der Beobachtungspunkte zur Mündung des Hauptzuflusses und zur Ausmündung des Abflusses ordnen, so ergibt sich, daß die Durchsichtigkeit des Seewassers zunimmt, je mehr man sich von der Mündung des Zuflusses entfernt.

Genfer See		Bodensee	
Meillerie . .	9,0 m	Bregenz . . .	3,3 m
Pully . . .	9,7 „	Lindau . . .	3,4 „
Evian . . .	10,4 „	Friedrichshafen	5,2 „
Morges . . .	10,1 „	Romanshorn .	6,2 „
Thonon . . .	11,3 „	Konstanz . .	8,7 „
Nernier . . .	11,0 „		

Auch ganz lokale Schwankungen zeigen sich: das littorale Wasser ist trüber, d. h. undurchsichtiger als das

[1]) Vergl. Schriften des Vereins für die Geschichte des Bodensees. XXII. 33. Lindau 1893.

pelagische; die Durchsichtigkeit ist vor einem Kap größer als am hinteren Ende einer Bucht; die Undurchsichtigkeit nimmt zu, je mehr man sich der Mündung eines städtischen Abfuhrkanals nähert.

Diesen Veränderungen der Durchsichtigkeit liegen wahrscheinlich zwei Ursachen zu Grunde:

1. Das trübe mit Schlamm beladene Wasser der Zuflüsse mischt sich mit dem Seewasser. Diese Mischung kann in folgender Weise stattfinden:

a) Wenn das Wasser des Zuflusses leichter ist als das Seewasser[1]), so breitet es sich an der Oberfläche des Sees aus, hier geradezu flache Kegel von Flußwasser bildend, das von den Strömungen mehr oder weniger weit verfrachtet wird.

b) Wenn das Wasser der Zuflüsse schwerer ist als dasjenige des Sees, z. B. infolge seiner niederen Temperatur oder infolge der Beschwerung mit schwebenden Substanzen, so mischt sich ein Teil desselben gleichwohl durch den Wellenschlag an der Flußmündung mit dem Seewasser. Wie klein auch diese Menge Flußwasser und wie groß die Menge Seewasser, mit der jenes sich mischt, sein mag, sie genügt, um die Durchsichtigkeit des Seewassers bedeutend zu verringern.

2. Andererseits kann die Trübung des Wassers auch durch eine stärkere Entwickelung von Mikroorganismen oder Mikroben in den oberen Schichten des Sees bedingt sein. Diese Organismen entwickeln sich im Sommer weit zahlreicher als im Winter.

Da ich sowohl im Genfer See als auch im Bodensee an allen Stationen jahreszeitliche Schwankungen der Sichtbarkeitsgrenze, ebenso aber auch Schwankungen von Ort zu Ort zu jeder Jahreszeit beobachtet habe, so glaube ich annehmen zu dürfen, daß beide Faktoren gleichzeitig nebeneinander wirken; die regionalen Schwankungen dürften hauptsächlich den Zuflüssen, die jahreszeitlichen

1) Nach meinen Beobachtungen am Genfer See ist das Wasser der Zuflüsse des flachen Landes nur während der Frühlingsmonate wärmer und infolgedessen leichter als das Seewasser. In den Seen, deren Wasser stark mit Salzen beladen ist, können die Verhältnisse ganz anders liegen.

hauptsächlich der ungleichen Entwickelung des organischen Lebens zuzuschreiben sein. Entsprechende Beobachtungen sollten auch in anderen, nicht subalpinen Seen angestellt werden. Vielleicht, daß sich unter anderen Verhältnissen andere Resultate und daher auch andere Schlußfolgerungen ergeben.

Die Durchsichtigkeit des Wassers kann von einem See zum anderen bedeutende Verschiedenheiten aufweisen. Nehmen wir wieder unsere beiden großen Seen, da für sie streng vergleichbare, nach den gleichen Methoden gewonnene Werte vorliegen; die mittlere Sichtbarkeitsgrenze liegt im Genfer See in 10,2 m Tiefe, im Bodensee in 5,4 m; der Unterschied beträgt hiernach beinahe 100 %.

Wie lassen sich solche Unterschiede erklären? Ehe aus einer großen Anzahl von Seen vergleichbare Messungen vorliegen, ist es verfrüht, eine allgemeine Erklärung zu geben. Ich möchte nur eine Thatsache anführen, die mit diesen Unterschieden in der Durchsichtigkeit des Wassers in Verbindung zu stehen scheint. Das ist die Eigenfarbe des Wassers. Grüne Seen, wie z. B. der Bodensee oder der Hallstatter See [1]), sind weniger durchsichtig als blaue Seen, wie der Genfer See oder der Gardasee. Nach den Untersuchungen von A. Garbini [2]) ist das azurblaue Wasser dieses letzteren Sees im Mittel bis zu einer Tiefe von 15,0 m durchsichtig. Die Sichtbarkeitsgrenze liegt also noch 5 m tiefer als im Genfer See.

Ich füge noch einige Extreme der Sichtbarkeitsgrenze hinzu.

Ein Minimum von nur wenigen Decimetern Tiefe wird in den durch Wellenschlag getrübten Gewässern, die auf schlammigem Grunde ruhen, beobachtet.

Als Maximalwerte ergaben sich:

im Hallstatter See	8,8 m	(Lorenz von Liburnau)
„ Bodensee	11,5 „	(Kommission für Bodenseeforschung)

[1]) Die mittlere Sichtbarkeitsgrenze liegt im Hallstatter See nach von Lorenz bei 5,5 m Tiefe. Mitteil. d. k. k. geogr. Ges. Wien 1898.

[2]) A. Garbini, Alcune notizie fisiche sulle acque del Benaco. Rivista Geogr. ital. IV. 1—3. Florenz 1897.

im	Genfer See	21,5 m	(F. A. Forel)
„	Benaco	21,6 „	(A. Garbini)
„	Tahoe (Kaliforn.)	33 „	(J. Leconte)

In zwei Bergseen habe ich noch größere Werte erhalten, indem ich die Sichtbarkeitsgrenze in horizontaler Richtung feststellte, d. h. indem ich die Entfernung einer eingetauchten Scheibe im Augenblick des Verschwindens vermittelst eines um 45° geneigten im Wasser befindlichen Spiegels bestimmte. Ich fand auf diese Weise die Sichtbarkeitsgrenze an der Oberfläche des Blauen Sees bei Kandersteg im Berner Oberland zu 34 m, in der Gouille Perse bei Arolla im Wallis sogar über 60 m [1]). Es ist dies der größte bis jetzt durch direkte Beobachtung erhaltene Wert. Diese beiden in horizontaler Richtung gemachten Bestimmungen sind allerdings mit den in vertikaler Richtung vorgenommenen nicht völlig vergleichbar: In horizontaler Richtung durchdringt der Lichtstrahl die betreffende Wasserschicht ein einziges Mal, in vertikaler hingegen zweimal, einmal um die untergetauchte Scheibe zu beleuchten, ein zweites Mal, um von der Scheibe zurück in das Auge zu gelangen.

2. Farbe der Seen: Eigenfarbe.

Das Wasser eines Sees hat stets eine bestimmte Eigenfarbe. Allerdings ist die Eigenfarbe des Wassers wenig ausgesprochen. Absolut reines Wasser erscheint in einer Schicht von weniger als 1 m Dicke ganz farblos. Sobald aber seine Dicke einige Meter übersteigt, zeigt es immer eine dunklere Farbe. Wenn man einen See, dessen Tiefe so groß ist, daß der Boden des Beckens nicht mehr durchschimmert, senkrecht von oben betrachtet, so erscheint dessen Wasser blau, grün, gelblich, grau, braun, schwarz, rötlich oder violett, je nach der Jahreszeit und je nach seinen Eigenheiten.

Destilliertes Wasser, wie es Tyndall, Soret und

---

[1]) Da der See nur 60 m lang ist, so gelangte ich nicht bis zur Sichtbarkeitsgrenze; nach der Schärfe des Bildes zu schließen, dürfte dieselbe zwischen 80 und 100 m liegen.

Spring untersuchten, erscheint blau. Die Farbe ist prachtvoll azurblau, gleich der Farbe des klaren Himmels, wenn man sie in einer mit Wasser gefüllten Röhre von 6 m Länge bei durchfallendem Licht beobachtet; je länger die Röhre, desto satter das Blau, bis zu einer Rohrlänge von 26 m, wie sie Spring 1895 benutzte.

Die blaue Farbe ist durch die selektive Absorption des Lichtes im Wasser bedingt. Das Absorptionsspektrum des Wassers zeigt im Orangegelb zwei Absorptionsstreifen [1]). Je mehr die Dicke der Wasserschicht zunimmt, desto mehr werden die anderen Farben ausgelöscht, desto mehr dominiert das Blau; schließlich gelangt dieses allein in das Auge des Beobachters. Die weniger brechbaren Strahlen werden schneller und vollständiger absorbiert, als die stärker brechbaren (Hüfner und Albert).

Die blaue Farbe des Wassers wird nicht durch dessen chemische Reinheit bedingt. Das Meerwasser, z. B. des Mittelmeeres und der tropischen Meere, ist trotz seines Salzgehaltes von 3½ % intensiv blau. Farblose Salze sind also ohne Einfluß auf die blaue Farbe des Wassers.

Wie kommt es nun, daß wir diese so charakteristische blaue Farbe des Wassers in durchfallendem Licht sehen, wenn wir vom Schiffe aus im See draußen das Wasser senkrecht von oben betrachten? Das Auge empfängt in diesem Falle nur reflektiertes Licht. Warum erscheint dieses reflektierte Licht blau?

Wenn das Seewasser physikalisch rein wäre, so würde es schwarz erscheinen. Wie bereits oben ausgeführt, ist der Grund des Sees bei genügender Tiefe dunkel, schwarz, weil das Licht durch das Wasser völlig absorbiert wird. Das Wasser als durchsichtiger Körper würde nicht erleuchtet sein. Die ganze Wassermasse würde lichtlos, schwarz erscheinen.

Das Wasser enthält jedoch zahllose mineralische und lebende oder abgestorbene organische Partikel, die

---

[1]) Soret et Sarasin, Archives de Genève XI. 327. 1881.

ebenso zahlreiche Lichtschirme bilden, an denen das Licht zurückgeworfen wird. Auf diesen reflektierten Lichtstrahlen beruht die Erleuchtung des Wassers.

Die Erleuchtung des Wassers ist am besten an dem eigentümlichen Schein zu erkennen, der auf einem bewegten See den Schatten des Kopfes des Beobachters umgibt. Jedes Wellenthal bildet eine cylindrische konkave Linse, die die Sonnenstrahlen zerstreut, jeder Wellenkamm dagegen eine cylindrische konvexe Sammellinse. Es ergibt sich daraus, daß das Wasser von verschiedenen Beleuchtungsebenen durchsetzt ist, deren Lage einerseits durch die Sonne, andererseits durch die Richtung der Wellen des Sees bedingt wird. In gewissen Ebenen ist die Beleuchtung stärker, in anderen schwächer als im Mittel. Das Auge erkennt und unterscheidet diese verschiedenen Beleuchtungsebenen aber nur, wenn es sich mit ihnen in der gleichen Ebene befindet. Es nimmt daher nur diejenigen Beleuchtungsebenen wahr, die durch die Achse der Wellen, die Sonne und das Auge selbst gehen. Diese Ebenen entsprechen Revolutionsebenen, die sich um eine durch die Sonne und das Auge gebildete Achse drehen. Ihr Austritt aus der horizontalen Wasseroberfläche bedingt das Auftreten von alternierend hellen und dunklen Strahlen, die um den Schatten des Kopfes des Beobachters herum divergieren. Wer darauf aufmerksam gemacht ist, wird diesen „Heiligenschein“ leicht wahrnehmen. Derselbe ist ein schlagender Beweis dafür, daß mit Stäubchen beladenes Wasser erleuchtet ist.

Das Licht, das zu diesen aus Stäubchen gebildeten Lichtschirmen gelangt, wird infolge der selektiven Absorption der durchdrungenen Wasserschicht bläulich. Das Blau wird infolge der selektiven Absorption auf dem Rückweg durch das Wasser verstärkt. Es kommt also blaues Licht zum Auge zurück; so erscheint das Wasser in reflektiertem Licht blau. Die Intensität dieser vom See reflektierten blauen Farbe hängt von dem größeren oder geringeren Staubgehalt des Wassers ab. Enthält letzteres viel Staub suspendiert, so wird eine größere Menge Licht durch eine dünne Wasserschicht zurück-

geworfen. Da die selektive Absorption des Wassers in einer dünnen Schicht weniger stark ist, so ist das Blau heller. Enthält das Wasser wenig Staubteilchen, so durchdringt das Licht eine dickere Schicht, die selektive Absorption ist stärker, das Blau erscheint dunkler. Seen, deren Wasser im Winter durchsichtiger ist als im Sommer, sind im Winter auch intensiver blau. Allerdings zeigt das Wasser der Seen selten die wundervoll himmelblaue Farbe des Garda- und des Genfer Sees, des Achensees, des Blauen Sees von Kandersteg, des Sees von Arolla; meistens hat das Blau einen Stich ins Grünliche. Die häufigsten Farbentöne sind grünlich-blau, grünlich, gelblich-grün oder grünlich-braun.

Die Grünfärbung und die Braunfärbung des Wassers der Seen werden heute auf zwei verschiedene Weisen erklärt.

a) Durch die Springsche Theorie; Spring hat festgestellt, daß die Beimengung äußerst feiner durchsichtiger kleinster Teilchen die blaue Farbe des Wassers in durchfallendem Lichte in grün umändert [1]).

b) Durch die Theorie von Wittstein, nach der die grünliche Farbe durch einen Gehalt des blauen Wassers an organischen Säuren — Humin- und Ulminsäuren — bedingt sein soll [2]).

Da das Wasser der grünen Seen, auch nachdem es durch ein Chamberlandsches Porzellanfilter gegangen ist, seine Farbe nicht ändert, so bin ich geneigt, die Wittsteinsche Erklärung anzunehmen. Durch Mischung von Torfwasser mit dem blauen Wasser des Genfer Sees habe ich sämtliche Farbentöne der grünlichen und gelben Seen erhalten können; wird Torfwasser im Ueberschuß zugesetzt, so stellen sich die braunen und schwarzen Töne der Torf- und Moorseen ein.

Die Frage nach der Farbe der Seen hat durch eine jüngst veröffentlichte Arbeit von W. Spring [3]) einen be-

---

1) Bull. Acad. R. Belgique V. 55. Brüssel 1883.
2) Poggendorffs Ann. XLV. 474. 1881.
3) Sur le rôle des composés ferriques et des matières humiques dans la coloration de l'eau. Archives des Sc. phys. V. 5. Genève 1898.

deutenden Schritt vorwärts gemacht. In dieser Arbeit konstatiert Spring, daß sowohl die Eisensalze (kolloidales Ferrihydrat) als auch die organischen (Humus-)Säuren in den Seen und Flüssen in viel größerer Menge vorhanden sind, als erforderlich wäre, um die blaue Farbe ihres Wassers in grün, gelblich oder braun umzuwandeln. Sodann hat Spring beobachtet, daß Ferrioxyd und Humussubstanzen aufeinander einwirken. Diese letzteren reduzieren das Ferrioxyd und schlagen sich dabei als flockiges, schwärzliches Koagulum nieder. Diese Reaktion tritt nur in Gegenwart des Sonnenlichtes ein. Das so gebildete Eisenoxydul hat ein weit schwächeres Färbungsvermögen als das Eisenoxyd. Es ist also in Bezug auf die Färbung des Wassers als indifferenter Körper zu betrachten. Enthält das Wasser Sauerstoff in Lösung, so wird das Ferrioxyd regeneriert und kann von neuem auf die Humussubstanzen einwirken, bis diese vollständig ausgefällt sind. Es dürfte durch Berücksichtigung dieser wechselseitigen Reaktionen eine befriedigende Lösung der schwierigen Frage nach der Farbe des Wassers der Seen sich ergeben.

Die Farbe des klaren Seewassers zeigt also alle Abstufungen vom Himmelblau durch Grün, Gelb und Braun zum Schwarz.

Die Grundfarbe des Wassers kann aber auch durch suspendierten farbigen Staub verändert werden. So bringen beispielsweise:

a) die Mineralbestandteile des trüben Wassers eines Zuflusses graue, gelbliche oder braune Töne hervor;

b) desgleichen der Schlamm, der an einem schlammigen Ufer vom Wellenschlag aufgewirbelt wird;

c) organische Staubteilchen, insbesondere Pollenkörner von Koniferen, werden durch die Oberflächenströmung zusammengetrieben und bilden gelbliche Flecke, die unter dem Namen „*Fleur du lac*“ (Seeblüte, Schwefelregen) bekannt sind.

d) Grüne Algen (*Pandorina morum* im Genfer See), braune (*Beggiatoa roseopersicina* im Lac de Bret), violettrötliche (*Oscillatoria rubescens* im Murtensee, *Clathro-*

cystis aeruginosa im Plönsee) etc. können sich unter günstigen Umständen in so ungeheuren Mengen entwickeln, daß sie dem See eine vorübergehende lokale Färbung erteilen. Das Auftreten solcher Algen, die die pelagische Region unserer Seen oft so auffallend färben, ist ebenfalls unter dem Namen des „Seeblühens“ bekannt.

3. Oberflächenreflexion. Scheinbare Farbe.

Wenn man den See unter einem schiefen Winkel betrachtet, so spiegeln sich günstig gelegene Gegenstände an seiner Oberfläche wieder. Je größer der Einfallswinkel, desto größer die Menge des reflektierten, desto kleiner die Menge des in das Wasser eindringenden gebrochenen Lichtes [1]). Vom Ufer aus betrachtet, erscheint die Oberfläche des Sees gefärbt, doch nicht in den Tönen des Seewassers, sondern in denjenigen der jenseits des Sees gelegenen Landschaft. Wenn der See ruhig und spiegelglatt ist, so ist die Reflexion sehr vollkommen. Das Bild der erhöhten Gegenstände des entgegengesetzten Ufers, sowie des sich darüber wölbenden Himmels ist nicht merklich verzerrt. Die Seeoberfläche ist allerdings als Teil der Oberfläche der Erde ein konvexer Spiegel. Ihr Krümmungsradius ist aber so groß, daß die durch die gewölbte Fläche verursachte Verzerrung der Beobachtung entgeht. Die Verzerrung der Bilder ist nur deutlich, wenn sich die gespiegelten Gegenstände nur wenige Gradminuten über den Horizont erheben. Die Bilder erscheinen alsdann zusammengedrückt und um die Hälfte bis ein Drittel ihrer Höhe verkleinert. Diese sogenannten Dufourschen Bilder entstehen bei der Reflexion auf einer schwach konvexen spiegelnden Fläche.

Sobald sich die Oberfläche des Sees unter dem Einfluß des Windes oder irgend eines mechanischen Impulses auch nur im geringsten kräuselt, vollzieht sich die Reflexion unter ganz anderen Bedingungen. Jede

[1]) Als Einfallswinkel wird bekanntlich der Winkel bezeichnet, den der einfallende Strahl mit einer auf der spiegelnden Fläche senkrecht stehenden Geraden bildet.

Welle stellt einen cylindrischen, im Wellenkamm konvexen, im Wellenthal konkaven Spiegel dar, der bei größerem Einfallswinkel verzerrte, in ihrer Höhe verkleinerte virtuelle Bilder der gespiegelten Gegenstände gibt. Der konkave Teil der Welle erzeugt verkehrte, der konvexe Teil aufrechte Bilder. Jedes Spiegelbild umfaßt verkleinert den ganzen Gesichtskreis, den Hintergrund der Landschaft vom Horizont bis zum Zenith. Diese Spiegelbilder sind nur auf gleichmäßig langsam rollenden, runden Wellen deutlich sichtbar. Sobald die Wellen schneller laufen und ihre Profillinie nicht mehr streng einer Trochoide entspricht, sondern asymmetrisch wird, werden die Bilder verwickelt und undeutlich, obgleich sie sich immer nach denselben angeführten Gesetzen bilden.

Jede Welle gibt also ein doppeltes Bild der beleuchteten, dem Beobachter gegenüber in der vertikal zur Spiegelfläche stehenden Reflexionsebene gelegenen Gegenstände. Wenn das gespiegelte Objekt starken Lichtglanz besitzt, wie z. B. die Sonne, der Mond, die Planeten Venus und Jupiter, so wird jedes Bild als glitzernder Funke vom Auge wahrgenommen. Da die Wellen niemals ganz regelmäßig sind, so breitet sich der Funkenstreifen rechts und links von der Reflexionsebene aus, weil auch die seitlich gelegenen, also aus der Hauptreflexionsebene etwas verschobenen Wellen Bilder hervorbringen. Je nach der Form und der Richtung der Wellen ist der Streifen mehr oder weniger breit und entweder mehr nach rechts oder nach links von der Reflexionsebene verschoben. Wenn der sich spiegelnde Gegenstand lichtschwach ist, z. B. das Firmament, eine weiße oder graue Wolke, ein am entgegengesetzten Ufer liegender Berg, so ist sein Spiegelbild aus einiger Entfernung nicht mehr deutlich zu sehen. Trotzdem trägt es zur Bildung einer gewissen Färbung der Oberfläche des von Wellen durchkreuzten Sees bei. Der Ton dieser Färbung ist die Resultante der Töne sämtlicher gefärbter sich spiegelnder Gegenstände und ihrer relativen Lichtstärke. Wenn die Wellen sehr breit, aber wenig hoch sind, wie z. B. bei der Dünung, so be-

halten die Bilder mehr oder weniger die Umrisse der sich spiegelnden beleuchteten Gegenstände; sie erscheinen jedoch in vertikaler Richtung deformiert und in die Länge gezogen. Das Bild eines jeden leuchtenden Punktes oder Kreises tritt als eine in der Reflexionsebene in die Länge gezogene Ellipse auf [1]). Wenn aber der Wellengang höher und unregelmäßiger wird, so wird das gefärbte Licht diffus zerstreut, wie wenn es sich auf einer matten Fläche spiegelte. Der resultierende Farbenton ist gleichförmig. Man sieht keine Spur von deutlichen oder verschiedenen Bildern mehr.

Wird endlich der Wellenschlag so stark, daß die Wellenkämme mit den Lichtstrahlen einen Winkel bilden, der Refraktion zuläßt, so gelangt ein Teil des vom Wasser selbst abgegebenen Lichtes in das Auge, verbindet sich dort mit den Reflexionsbildern und beeinflußt so den gesamten Farbeneindruck, der je nach der Natur des Sees mehr blau, grünlich, bräunlich oder schwärzlich ist, ja sogar grau oder gelblich sein kann, wenn das Seewasser durch Alluvionen der Zuflüsse verunreinigt ist. Wölbt sich gleichzeitig über dem See ein heiter blauer Himmel, so kombinieren sich die blauen Töne des Spiegelbildes des Himmels mit der Eigenfarbe des Sees. Es resultiert ein prachtvoller azurblauer Ton, wenn der See dem Typus der blauen Seen, ein seegrüner Ton (aquamarin), wenn der See dem Typus der grünen Seen angehört.

4. Refraktionserscheinungen und Spiegelungen.

Die nahe an der Oberfläche des Wassers und mit ihr fast parallel verlaufenden Lichtstrahlen durchdringen Luftschichten, die in der Regel sowohl thermisch als auch hygrometrisch stratifiziert sind. Die Temperatur der Luft ist meist verschieden von derjenigen der Wasseroberfläche. Die untersten Luftschichten werden infolgedessen im Kontakt mit der Wassermasse entweder erwärmt oder

[1]) J. Piccard, Phénomènes de reflexion à la surface des nappes d'eau. Archives de Genève XXI. 481. 1889.

abgekühlt. Wenn die kälteren Schichten unten, die wärmeren darüber liegen, so zeigt die Atmosphäre die direkte thermische Schichtung, im umgekehrten Falle die verkehrte [1]). Das Wasser gibt ferner an die Luft Wasserdämpfe ab, so daß die untersten mit dem Wasser in direkter Berührung stehenden Luftschichten gewöhnlich ganz oder fast ganz gesättigt sind. Mit wachsender Erhebung über die Wasserfläche nimmt der Wasserdampfgehalt etwas ab. Temperatur und Wasserdampfgehalt beeinflussen nun aber merklich den Brechungskoeffizienten der Luft, und zwar derart, daß derselbe um so kleiner wird, je wärmer und je feuchter die Luft ist. So kommt es, daß die Anwesenheit einer thermischen und einer hygrometrischen Schichtung der Luft eine Ablenkung der Lichtstrahlen von ihrer geradlinigen Bahn verursacht. Der Betrag der Brechung eines Lichtstrahles, der durch den von Schicht zu Schicht wechselnden Feuchtigkeitsgehalt der Luft hervorgerufen wird, ist sehr gering, sehr erheblich dagegen derjenige, der durch Temperaturunterschiede bedingt wird. Daher verdient allein der Einfluß der Temperaturschichtung auf den Weg der Lichtstrahlen eine nähere Betrachtung.

Infolge der Lichtbrechung erscheint sowohl die unter sehr spitzem Winkel betrachtete Oberfläche des Sees, als auch jeder Gegenstand, der sich nur wenig über die Wasseroberfläche erhebt, aus seiner wahren Lage verschoben und in seiner Form verzerrt.

---

[1]) Ich gebrauche hier die gleichen Ausdrücke, wie für die thermische Schichtung des Wassers (S. 105). Die direkte Schichtung ist diejenige, bei der die warmen Massen, als die leichteren, über den kalten, als den schwereren, lagern, die verkehrte Schichtung diejenige, bei der die kalten Massen über den warmen ruhen. Ich bin mir wohl bewußt, daß diese von mir angewendete Terminologie mit dem in der Meteorologie üblichen Ausdruck „Temperaturumkehr“, den man für die verhältnismäßig seltenen Fälle der Temperaturzunahme mit der Höhe in der Atmosphäre gebraucht, im Widerspruch steht. Nichtsdestoweniger glaube ich an meiner Terminologie festhalten zu müssen, weil sie physikalisch richtiger ist. In der That stellt das Eintreten der „Temperaturumkehr“ eigentlich die Rückkehr der Atmosphäre zum normalen Zustand, der direkten Schichtung nach der Temperatur, dar. Wenn dieser physikalisch normale Zustand seltener ist, als der abnorme, so führt sich das auf den Einfluß des Luftdruckes zurück, dessen Sinken mit wachsender Höhe eine Ausdehnung und damit eine Abkühlung der aufsteigenden Gase verursacht. Gleichen Druck vorausgesetzt gilt auch für Gase, daß sie je wärmer desto leichter sind. Ich hoffe, diese Erklärung wird jedes Mißverständnis beseitigen.

Sämtliche Refraktionserscheinungen können auf zwei allgemeine Typen zurückgeführt werden, nämlich

a) auf Refraktion über warmem Wasser; das Wasser ist wärmer als die Luft; die im Kontakt mit dem Wasser befindlichen Schichten der Atmosphäre sind relativ kühl und daher verkehrt geschichtet;

b) auf Refraktion über kaltem Wasser. Das Wasser ist kälter als die Luft, deren unterste Schichten direkt geschichtet sind.

Bezeichnen wir als wahren physischen Horizont den geometrischen Ort derjenigen Punkte der Seeoberfläche, in denen die durch das Auge des Beobachters gehenden Geraden die Seeoberfläche berühren, und als scheinbaren physischen Horizont den geometrischen Ort derjenigen Punkte, an denen ein in das Auge des Beobachters gelangender Lichtstrahl, sei er gebrochen oder nicht, die Oberfläche des Sees berührt. Die Weite oder der Radius des wahren, d. h. durch die Refraktion nicht modifizierten physischen Horizonts hängt von der Höhe des Beobachters über dem Wasserspiegel ab. Folgende Werte mögen einige Anhaltspunkte hierfür geben.

Höhe des Auges über dem See	Radius des Horizontes	Höhe des Auges über dem See	Radius des Horizontes
m	km	m	km
1	3,569	20	15,962
2	5,048	25	17,845
3	6,182	30	19,548
4	7,138	40	22
5	7,981	50	25
6	8,742	60	28
7	10,095	80	32
10	11,287	100	36
15	13,823	192	50

A) Refraktion über warmem Wasser.

Sie findet statt, wenn in der Luft eine verkehrte Temperaturschichtung besteht. Entspringt ein der Seeoberfläche fast paralleler, auf den Beobachter zueilender Lichtstrahl etwas über dem scheinbaren physischen Hori-

zont des Beobachtungspunktes, so dringt er jenseits dieses Horizontes in immer dünnere Luftschichten ein und wird dementsprechend gebrochen; er wird schließlich dadurch der Seeoberfläche völlig parallel, es tritt Totalreflexion ein und der Strahl erhebt sich hierauf wieder, durchdringt alsdann immer dichtere Schichten und gelangt endlich in das Auge des Beobachters. Er beschreibt also eine nach oben konkave Kurve. Die Richtung, die er beim Eindringen in das Auge besitzt, bildet mit einer durch das Auge gelegten horizontalen Ebene einen größeren Winkel, als es bei geradem Wege ohne Refraktion der Fall wäre. Daraus ergibt sich:

a) Der scheinbare physische Horizont ist herabgedrückt.

b) Der scheinbare physische Gesichtskreis ist zusammengezogen, d. h. die äußersten Punkte der Seeoberfläche, die man sieht, sind näher gerückt.

c) Innerhalb dieses Gesichtskreises erscheint infolgedessen die Konvexität der Seeoberfläche übertrieben. Man glaubt ein Stück der konvexen Kugelfläche der Erde wahrzunehmen, während das sonst nicht der Fall ist.

d) Wenn der See Wellen schlägt, so erscheint der Horizont außerordentlich stark gezahnt, da die Wellenkämme übertrieben hoch scheinen.

e) Einen dicht über dem Wasser und über dem scheinbaren physischen Horizont gelegenen Punkt sieht der Beobachter doppelt; denn zwei der von ihm ausgehenden Strahlen gelangen gleichzeitig in das Auge. Der eine dieser Strahlen wird nicht gebrochen, da er die tiefsten Luftschichten nicht passiert; er verläuft geradlinig und erzeugt im Auge des Beobachters ein normales Bild des Ausgangspunktes. Der andere wird gebrochen; er geht vom Objekt etwas schräg abwärts, dringt in die unterste, erwärmte Luftschicht ein, wird hier total reflektiert, beschreibt eine krumme, nach oben konkave Linie und gelangt etwas schräg von unten in das Auge; er bringt ein Bild des Ausgangspunktes hervor, das unter dem ersten liegt.

Aus der Kombination der verschiedenen Punkte eines beleuchteten Körpers entstehen auf diese Weise zwei Bilder, von denen das obere aufrecht, das untere dem oberen symmetrisch und verkehrt ist (der Totalreflexion wegen). Diese Erscheinung führt allgemein den Namen der Luftspiegelung *(mirage)*.

Im Herbst und Winter, wenn sich die Luft schneller abkühlt als das Wasser, treten solche Refraktionserscheinungen über warmem Wasser beinahe zu jeder Tageszeit auf. Desgleichen zeigen sie sich im Frühling und im Sommer am frühen Morgen, weil sich die Luft während der Nacht stärker abgekühlt hat als das Wasser.

B) Refraktion über kaltem Wasser.

Ueber kaltem Wasser zeigt die Luft die direkte thermische Schichtung. Die in der Nähe der Wasseroberfläche dieser fast parallel verlaufenden Lichtstrahlen beschreiben eine nach unten konkave Bahn. In das Auge des Beobachters gelangen sie in absteigender Richtung, die von der Vertikalen weniger abweicht, als das ohne Refraktion der Fall wäre. Es ergibt sich daraus:

a) Der scheinbare physische Horizont ist gehoben; er liegt hoch über dem wahren physischen Horizont;

b) der scheinbare physische Horizont liegt jenseits des wahren Horizonts;

c) innerhalb des Horizonts erscheint die Oberfläche des Sees konkav; eine Vertiefung scheint vor dem Beobachter zu liegen;

d) Objekte, die unter normalen Verhältnissen wegen der Krümmung der Erdoberfläche außerhalb des Gesichtskreises liegen würden, sind sichtbar;

e) dicht über dem Wasser, oberhalb des gehobenen scheinbaren physischen Horizonts liegende Punkte sieht man von oben nach unten zusammengedrückt und verzerrt. Ihre Höhendimensionen scheinen abgenommen zu haben.

Refraktionserscheinungen über kaltem Wasser treten in den Nachmittagsstunden der Frühlings- und Sommertage auf, wenn die Sonnenwärme die Temperatur der Luft stärker erhöht hat als diejenige des Wassers.

Wie findet nun der Uebergang von den Refraktionserscheinungen über warmem zu denjenigen über kaltem Wasser statt? An einem schönen Frühlingstage kann die Luft, die während der Nacht und am Morgen kälter war als das Wasser, sich sehr rasch erwärmen, die Temperatur des Wassers erreichen und schließlich übertreffen. Bei Windstille folgen die Refraktionserscheinungen nicht sofort den Aenderungen der Temperatur, die ein am festen Lande wenige Meter über der Seeoberfläche aufgehängtes Thermometer anzeigt. Die Spiegelungen, wie sie über warmem Wasser auftreten, bleiben oft noch stundenlang bestehen, auch wenn die Luft erheblich wärmer geworden ist, als das Wasser.

Die unter solchen Bedingungen entstandenen Bilder zeigen sämtliche Eigenschaften, die den Spiegelungen über warmem Wasser eigen sind, mit einem einzigen Unterschied: das umgekehrte untere Bild, statt dem oberen, aufrechten gleich und symmetrisch zu sein, erscheint zwar symmetrisch, aber von oben nach unten zusammengedrückt. Seine Höhe ist nur die Hälfte oder sogar nur ein Viertel der Höhe des oberen Bildes. Wir haben diese Erscheinung als Spiegelung über kaltem Wasser bezeichnet.

Ganz plötzlich ändert sich nun das Bild, wahrscheinlich unter dem Einfluß eines vom Lande her streichenden Windes, der das labil gewordene Gleichgewicht der Luftschichten stört. Die Refraktionsbilder über kaltem Wasser erscheinen zuerst an einem Ende des Horizonts und nehmen allmählich dessen ganze Peripherie ein. Da wo sich diese Veränderungen in größerer oder geringerer Breite vollziehen, erscheint das eigentümliche Phänomen der Fata morgana [1]). Beleuchtete, jenseits des Gesichtskreises befindliche Objekte werden in der Luft sichtbar, aber deformiert zu nebeneinander liegenden Rechtecken. Der obere Teil des Bildes ist die Fortsetzung des Horizontes, gehoben

---

[1]) A. Delebecque erklärt die Fata morgana durch eine Kombination verschiedener superponierter Spiegelbilder. Archives de Genève XXVII. 358. 1892.

durch die Refraktion über kaltem Wasser, der untere Teil die Fortsetzung des Horizontes deprimiert durch die Spiegelung, wie sie über warmem Wasser stattfindet. Diese Rechtecke erwecken den Eindruck einer felsigen Steilküste, eines Kliffs, oder noch mehr von Häusern,

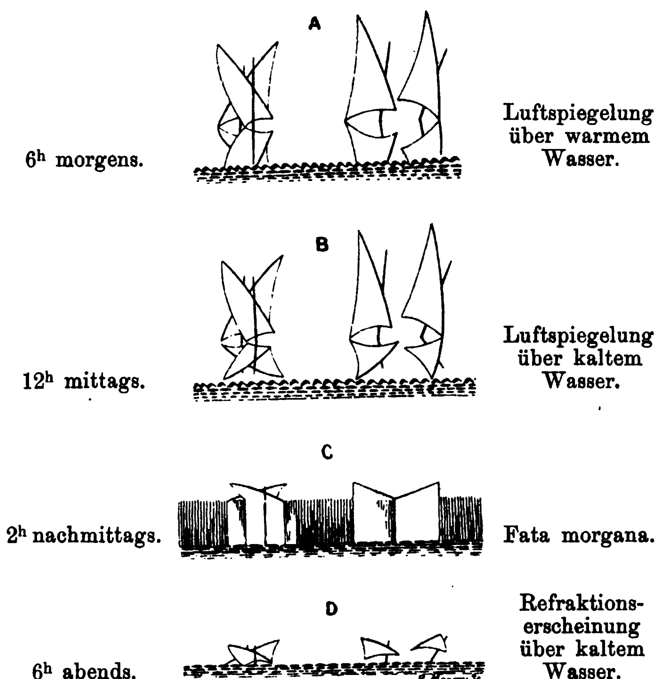


Fig. 16. Aufeinanderfolge der an einem schönen, warmen Frühlingstage durch Luftspiegelung und Refraktion entstehenden Bilder zweier Segelboote.

die am Quai einer Riesenstadt gelegen sind. Die ganze Erscheinung der Fata morgana mit ihren Palästen verschiebt sich in dem Maße am Horizonte, als die Refraktion über kaltem Wasser den Raum einnimmt, den die Refraktion über warmem Wasser verliert.

Der umgekehrte Vorgang, der Uebergang der Spiegelung über kaltem zur Spiegelung über warmem Wasser

findet nachts statt und entzieht sich daher der Beobachtung.

Wir illustrieren unsere Beschreibung durch Bilder zweier Frachtschiffe, wie sie durch die an einem schönen Frühlingstage am Genfer See sich aufeinander folgenden Spiegelungserscheinungen hervorgebracht werden. Wir nehmen an, daß die Schiffe sich in einer Entfernung von 10—15 km von dem am Strande stehenden Beobachter befinden. (Fig. 16.)

Außer diesen Haupttypen der Brechung und Spiegelung über kaltem und über warmem Wasser und der sogenannten Fata morgana treten hier und da kompliziertere Erscheinungen auf, wie mehrfache, kombinierte, parallele, obere und untere Spiegelungen etc. [1]). Die Bedingungen, unter denen sie eintreten, sind jedoch noch nicht genügend erforscht. Wir empfehlen ihr Studium den Anwohnern der Seen.

VI. Kapitel.

Biologie.

1. Allgemeiner Teil.

Die Biologie beschäftigt sich mit den Lebewesen. Die limnologische Biologie bezweckt das Studium der in den Seen existierenden Pflanzen und Tiere. Die Eigentümlichkeiten des Mediums, in dem diese Organismen leben, sind folgende: Eine große Wassermasse, die im Gegensatz zum fließenden Wasser der Flüsse ruht, dabei aber im Gegensatz zum stagnierenden Wasser eines Teiches beweglich und bewegt ist, an ihrer Oberfläche durch den Wellenschlag, in all ihren Schichten durch Strömungen verschiedenster Art; tief genug, um verschiedene, übereinander gelagerte Ansiedelungszonen zu ermöglichen; Wasser von gleichmäßiger chemischer Zusammensetzung, die in Abflußseen konstant, in abflußlosen Seen dagegen von Jahreszeit zu Jahreszeit variabel

[1]) Siehe Forel, Léman II. 514—565.

ist und von See zu See merkliche Unterschiede zeigen kann; Wasser, das durch Flüsse fortwährend neue Mengen organischer Substanzen erhält; Wasser, das bis in seine tiefsten Schichten hinreichend durchlüftet ist, dank den Convektionsströmungen verschiedenster Art, die Wasser von der Oberfläche zur Tiefe hinabsinken lassen; Wasser, dessen Temperatur in den oberen Schichten innerhalb konstanter Grenzen schwankt, in den Tiefen beinahe unveränderlich ist; klares Wasser, das Licht in bedeutende Tiefen eindringen und daher Objekte auf ziemliche Entfernungen sichtbar sein läßt.

Durch seine Zuflüsse steht der See mit sämtlichen Gewässern seines Nährbeckens in Verbindung, durch seinen Abfluß, wenn ein solcher vorhanden ist, mit dem Ozean, durch die Atmosphäre indirekt mit den Gewässern anderer hydrographischer Becken. Das sind alles Bedingungen, die für eine reiche Entwickelung des animalischen und pflanzlichen Lebens sehr günstig sind. Allerdings finden sie sich nicht überall gleichmäßig vereinigt. Sie wechseln von See zu See und zwar speziell in folgender Hinsicht:

1. Das Klima des Sees wird durch seine geographische Lage in Bezug auf Breite und Meereshöhe bedingt;

2. die Dimensionen des Sees, die Größe seiner Oberfläche, seine Tiefe haben ihren Einfluß. Von seiner Ausdehnung hängt besonders die Stärke des Wellenschlags, überhaupt aller Bewegungen des Wassers ab; die Größe seines Volumens bedingt die chemische und teilweise auch die thermische Stabilität. Von der Tiefe hängen die Existenzbedingungen der auf der Sohle des Sees lebenden Organismen ab;

3. die Beschaffenheit des Seebodens. Je nachdem dieser aus anstehendem Gestein, aus erratischen Blöcken, aus Geröll, Kies, Sand, Schlamm, aus mehr oder weniger feinen Fluß- und Seealluvionen kalkiger oder kieseliger Natur besteht, sind die Lebensbedingungen an den verschiedenen Stellen jedes einzelnen Sees wie von See zu See verschieden;

4. die chemische Zusammensetzung des Wassers ist von hervorragender Wichtigkeit. Das Seewasser kann süß oder salzig sein. Im Süßwasser beträgt die Summe der gelösten Salze 20—500 mg im Liter. Der Salzgehalt von Salzseen kann denjenigen des Meeres erreichen und übertreffen. Bei gewissen Salzseen dominiert schwefelsaures Natron, bei anderen Chlornatrium, wieder bei anderen Borax etc. Auch der Gehalt an gelösten organischen Substanzen beeinflußt die Entwickelung des Lebens;

5. die Temperatur des Wassers ist von Bedeutung; je nachdem der See unserem tropischen, gemäßigten oder polaren Typus angehört, je nachdem das Wasser immer über oder unter 4° bleibt oder um 4° herum schwankt, sind die Lebensbedingungen verschieden;

6. längeres oder kürzeres Gefrieren eines Sees bewirkt gewaltige Störungen der Lebensbedingungen der Organismen: die einen können sich diesen neuen Bedingungen anpassen, die anderen gehen zu Grunde;

7. desgleichen ist die Durchsichtigkeit des Wassers für die Lebensfunktionen zahlreicher Organismen nicht ohne Bedeutung;

8. die mehr oder weniger bequemen Verbindungen des Sees mit den übrigen Gewässern seines Einzugsgebietes oder mit benachbarten Einzugsgebieten begünstigen oder erschweren die Einwanderung der Organismen und bestimmen so den Reichtum der Fauna und Flora.

Die Lebensbedingungen in einem See unterscheiden sich von denen in anderen flüssigen Medien, und zwar besonders in folgenden Punkten:

Flüsse und Ströme besitzen Wasser, das fortwährend in der gleichen Richtung abfließt; das Wasser zieht vorbei und kehrt nicht wieder. Ihre Wassermassen werden durch Wellenschlag gar nicht oder nur an bestimmten Stellen bewegt. Ihre Oberfläche ist wenig ausgedehnt; sie besitzen eine geringe Tiefe und werden in Zeiten von Hochwasser durch Schlamm getrübt. Ihre chemische Zusammensetzung ist veränderlich.

Sümpfe haben überhaupt keine Tiefe; sie zeigen weder Wellen noch Strömungen. Ihr stagnierendes, totes Wasser wird durch die Verwesung der Sumpfpflanzen mit ihren stets von Luft umflossenen und dem Leben in der Luft angepaßten Assimilationsorganen verunreinigt. Die Temperatur schwankt in sehr weiten Grenzen. Im Winter führen die Sümpfe sehr kaltes, im Sommer sehr warmes Wasser.

Unterirdische Gewässer fließen in mehr oder weniger breiten und tiefen Kanälen. Sie verhalten sich in diesem Punkte wie die offenen Flüsse. Allein sie stehen nicht in direkter Verbindung mit der Atmosphäre, die thermischen Schwankungen sind auf ein Minimum reduziert; Licht dringt nicht bis zu ihnen.

Das Meer unterscheidet sich von den Süßwasserseen durch seinen starken Salzgehalt, während es hierin mit Salzseen größere oder geringere Aehnlichkeit besitzt. Doch ist es sehr fraglich, ob es Salzseen gibt, deren chemische Zusammensetzung genau derjenigen des Meeres entspricht. In biologischer Hinsicht ist das Meer, abgesehen von seinen riesigen Dimensionen, die sehr mächtige mechanische Bewegungen des Wassers ermöglichen, durch den direkten Zusammenhang aller seiner Wassermassen von Becken zu Becken ausgezeichnet. Anders die Seen: ihre streng isolierten Wassermassen entbehren einer unmittelbaren Verbindung untereinander und mit dem Ozean.

So finden die Organismen in den Seen ganz eigene, von denjenigen anderer Gewässer verschiedene Existenzbedingungen. Aus den allgemeinen Ergebnissen der Biologie wissen wir, daß die verschiedenen Bedingungen der Medien Unterschiede in der tierischen und pflanzlichen Bevölkerung einer Region zur Folge haben müssen. Daher müssen auch die lacustren Floren und Faunen ihre Eigentümlichkeiten aufweisen. Diese Eigentümlichkeiten, die sich besonders auch in der Zusammensetzung der Floren und Faunen und in ihren biologischen Verhältnissen äußern, gilt es zu schildern.

Wir müssen leider gleich vorausschicken, daß wir

für zwei Typen von Seen auf eine solche Darstellung verzichten müssen. Es sind dies die unterirdischen Seen und die Salzseen. So interessant gerade hier biologische Untersuchungen wären, so bin ich doch nicht in der Lage, solche anzustellen, da solche Seen in der näheren und weiteren Umgebung meines Wohnortes fehlen. Zweifelsohne werden sich bald Naturforscher finden, die auch diese Seen in biologischer Richtung durchforschen. Manches Neue von allgemeinem Interesse dürfte hier zu finden sein. Ich kann hier nur einige Andeutungen geben.

Unterirdische Seen. Im Verlaufe eines unterirdischen Flußbettes entstehen mehrfach beträchtliche Weitungen, die durch Bildung eines Dammes zu einem See umgewandelt werden können. Das Wasser verweilt relativ lange Zeit in diesen Weitungen; dadurch unterscheiden sich die unterirdischen Seen prinzipiell von den mit fließendem Wasser erfüllten Kanälen. Eine theoretische und experimentelle Analyse der hier herrschenden Verhältnisse wird jedenfalls zur Entdeckung von Eigenschaften führen, die sowohl in physikalischer als auch in biologischer Hinsicht charakteristisch sind. Näheres über diese Eigenheiten können wir heute bei dem Stande der Höhlenforschung nicht angeben. Einzelne feststehende Thatsachen sollen an anderer Stelle zusammen mit den unterirdischen Gewässern behandelt werden.

Salzseen. Schon eine geringe Aenderung der chemischen Zusammensetzung des Wassers führt gewöhnlich in kurzer Zeit das Absterben des größten Teiles der im See lebenden aquatischen Flora und Fauna herbei. Eine künstliche Anpassung an veränderte Verhältnisse konnte nur bei besonders widerstandsfähigen Arten erreicht werden und auch bei ihnen nur, wenn die Aenderung des Salzgehaltes äußerst langsam vor sich ging. So ist es begreiflich, daß die Flora und die Fauna eines Salzsees nicht ohne weiteres in einen anderen See von abweichender Zusammensetzung übergeführt werden kann. Daher hat jeder Salzsee Lebewesen und Gesellschaften, die ihm eigen sind. Doch auch hier sind die biologi-

schen Forschungen nicht genügend weit fortgeschritten, um eine allgemein gültige Darstellung der Bevölkerung der Salzseen zu gestatten. Es bleibt dies späteren Untersuchungen vorbehalten.

Trotzdem glaube ich, daß die wichtigsten aus dem Studium der Süßwasserseen sich ergebenden biologischen Thatsachen auch für Salzseen gültig sein werden. Es gibt allerdings jedenfalls zwei Hauptbedingungen, die den Salzseen eigen sind und ihre biologischen Verhältnisse ganz wesentlich beeinflussen. Es sind dies:

a) Die Veränderlichkeit der chemischen Zusammensetzung des Wassers der meisten Endseen. In der regnerischen Jahreszeit wird in dem Maß, als das Volumen des Wassers zunimmt, die Konzentration der Salzlösung geringer. In der trockenen Jahreszeit nimmt dagegen die Konzentration zu. Die in einem Salzsee lebenden Organismen müssen natürlich diesen Schwankungen angepaßt sein. Diejenigen, denen die nötige Anpassungsfähigkeit fehlt, gehen sofort zu Grunde; so erklärt es sich, daß die Faunen und Floren der salzigen Endseen meist relativ arm sind.

b) Der Salzgehalt einiger Seen ist so bedeutend, daß organisches Leben darin nicht möglich zu sein scheint. Insbesondere wird vom Toten Meer in Palästina und von Salt Lake in Utah angegeben, daß sie keine Lebewesen beherbergen. Solche Seen wären demnach die einzigen Stätten der Erdoberfläche, an denen das Leben unmöglich wäre. Die Thatsache selbst scheint mir übrigens noch einer Bestätigung zu bedürfen.

2. Die Bewohner der Süßwasserseen.

Die große Mehrheit der nicht ozeanischen, innerhalb des Festlandes isoliert auftretenden stehenden Wassermassen gehört zu den Süßwasserseen. Die Anzahl der ihnen gemeinsamen biologischen Merkmale ist genügend, um eine allgemeine Darstellung derselben zu rechtfertigen.

Ich stütze mich bei dieser Darstellung auf die Verhältnisse in den temperierten Seen Centraleuropas und

Nordamerikas, die weitaus am besten bekannt sind. Die allgemeinen Thatsachen, die sich hier ergeben haben, dürften auch für die Seen anderer Regionen gültig sein.

Vorausgeschickt sei eine kurze Aufzählung der Organismen, die die Flora und Fauna der Süßwasserseen zusammensetzen.

Die pflanzlichen Organismen, die die Süßwasserseen Centraleuropas bewohnen, gehören hauptsächlich folgenden Familien an:

A) Phanerogamen.

I. Dicotyledonen.

Ranunculaceen. Ranunculus.
Nymphaeaceen. Nymphea, Nuphar.
Cruciferen. Subularia.
Droseraceen. Aldrovandia.
Alsineen. Arenaria.
Elatineen. Elatine.
Hippurideen. Hippuris.
Onagraceen. Epilobium.
Halorageen. Trapa, Myriophyllum.
Callitricheen. Callitriche.
Ceratophylleen. Ceratophyllum.
Lythrarieen. Lythrum, Peplis.
Crassulaceen. Bulliarda.
Umbelliferen. Berula, Helosciadium, Oenanthe.
Lobeliaceen. Lobelia.
Lentibulariaceen. Utricularia, Pinguicula.
Primulaceen. Hottonia.
Gentianaceen. Limnanthemum.
Scrophulariaceen. Gratiola, Veronica, Limosella.
Labieen. Scutellaria, Teucrium.
Plantaginaeen. Littorella.

II. Monocotyledonen.

Alismaceen. Alisma, Sagittaria, Damasonium.
Butomeen. Butomus.
Hydrocharideen. Hydrocharis, Stratiotes, Hydrilla, Elodea, Vallisneria.
Potameen. Potamogeton, Zanichellia.
Najadeen. Najas.
Lemnaceen. Lemna.
Araceen. Acorus.

Typhaceen. Typha, Sparganium.
Juncaceen. Juncus.
Cyperaceen. Scirpus, Cyperus, Cladium, Carex, Heleocharis.
Gramineen. Arundo, Phragmites, Oryza, Phalaris, Glyceria, Catabrosa.

B) Gefäßkryptogamen.

Equisetaceen. Equisetum.
Selaginellaceen. Isoëtes.
Hydropteriden. Salvinia.
Moose. Riccia, Fontinalis, Thamnium.

C) Thallophyten.

Characeen. Chara, Nitella.
Algen. Zahlreiche Arten.
Pilze. Schizomyceten und Phycomyceten.

Die tierischen Organismen sind in der Fauna der centraleuropäischen Seen durch folgende Ordnungen vertreten.

I. Vertebraten.

Säugetiere. Fischotter, Biber, Wasserratte etc.
Vögel. Ständige oder wandernde Palmipeden.
Reptilien. Die Cistuden einiger kleiner Seen.
Amphibien. Einige Frösche und Tritonen in kleinen Seen.

Fische der folgenden Familien:
Acanthopterygii. Perca, Lucioperca, Cottus, Blennius, Gobius.
Malacopterygii. Lota, Cypriniden, Salmoniden, Alosa, Esox, Silurus, Anguilla.
Ganoiden. Accipenser.
Cyclostomen. Petromyzon.

II. Arthropoden.

Insekten.
Coleopteren. Dytiscus, Hydroporus, Gyrinus, Hydrophilus, Haemonia, Donacia etc.
Hemipteren. Hydrocorysa.
Neuropteren. Larven von Pseudoneuropteren, Planipennen, Plicipennen.
Dipteren. Larven von Culiciden und Tipuliden.

Arachniden.
Hydrachniden in großer Zahl.
Acariden. Halacarus.
Tartigraden. Arctiscon.

Crustaceen.
Decapoden. Astacus.
Isopoden. Asellus.
Amphipoden. Gammarus, Niphargus.
Phyllopoden. Cladoceren, Ostracoden, Copepoden, Siphonostomen.

III. Mollusken.

Gasteropoden. Limnea, Valvata, Planorbis, Bythinia, Ancylus etc.
Lamellibranchen. Najaden, Cyclas, Pisidium.

IV. Würmer.

Hirudines. Clepsine, Nephelis, Piscicola, Branchiobdella.
Chaetopoden. Tubifex, Saenuris, Stylaria, Nais etc.
Nematoden, sowohl frei lebende als auch Parasiten.
Cestoden, die meisten Parasiten.
Trematoden. Parasiten.
Nemertiden. Tetrastemma.
Turbellarier, Bryozoën, Rotatoren } zahlreiche Genera.

V. Coelenteraten.

Hydriden. Hydra.
Schwämme. Spongilla.

VI. Protozoen.

Infusorien, Rhizopoden, Cilioflagellaten } zahlreiche Genera.

Wie man sieht, umfaßt die Flora und Fauna der Seen die große Mehrzahl der Süßwasserorganismen der Gegend; die Zahl der Arten, die die Seen meiden, ist relativ klein. Man kann geradezu sagen, daß kein einziges im Süßwasser lebendes Genus in Seen nicht vorkommt. Damit soll nicht gesagt sein, daß die be-

treffenden Organismen in jedem See vorkommen; das ist nicht der Fall. Allein wenn man eine größere Anzahl von Seen genau untersucht, so wird man in ihnen so ziemlich alle jene Organismen nachweisen können.

Diese pflanzlichen und tierischen Organismen bilden teils normale, teils zufällige Bestandteile der biologischen Gesellschaft des Sees. Sie sind jedoch in der Wassermasse nicht regellos verteilt, sondern finden sich vielmehr, je nach ihren besonderen Lebensbedingungen, in bestimmten Regionen des Sees.

Wir unterscheiden in einem See im wesentlichen drei Regionen, von denen jede eine eigene biologische Gesellschaft beherbergt. Es sind diese:

a) die littorale Region,
b) die Tiefenregion,
c) die pelagische Region.

In folgendem sollen diese Regionen in biologischer Hinsicht definiert und abgegrenzt werden. Wir werden dabei die Lebensbedingungen, denen die Gesellschaften dieser Regionen unterworfen sind, sowie die Gesellschaften selbst zu schildern haben.

Vor allen Dingen kommt es darauf an, einen bei biologischen Untersuchungen häufig wiederkehrenden Begriff scharf zu umgrenzen. Es handelt sich um den Unterschied zwischen ständigen und erratischen Arten. In jedem See existiert eine biologische Gesellschaft, die ständig darin lebt und sich fortpflanzt. Sie gibt dem See sein normales biologisches Gepräge. Gleichzeitig finden sich aber zufällig und unregelmäßig vorkommende fremde Organismen, die vom Lande her durch den Wind, aus den Flüssen und Sümpfen durch die Zuflüsse, aus den unterirdischen Wasserbecken durch unterseeisch austretende Quellen in den See gelangt sind. Auch zwischen den Gesellschaften der verschiedenen Regionen und Subregionen des Sees können zufällige Vermischungen vorkommen, indem einzelne Organismen auf ihren Wanderungen oder infolge von Strömungen aus ihren normalen Wohnsitzen verschleppt werden. Wir nennen solche Organismen, die zufällig in eine Umgebung

oder in eine Region gelangt sind, der sie normalerweise nicht angehören, erratische Arten. Wir kommen so zu einer allgemeinen biologischen Klassifikation, die genau der von Pavesi[1]) für die pelagischen Organismen eingeführten entspricht, in der die normal pelagisch lebenden Arten eupelagische, die erratisch vorkommenden tychopelagische Arten genannt werden. Ich ziehe die einfacheren Ausdrücke ständige und erratische Arten vor, weil sie auch auf die anderen Regionen des Sees anwendbar sind. Ich vermeide dabei absichtlich die Einführung neuer, dem Griechischen entnommener technischer Bezeichnungen, wie sie heutzutage selbst bei ganz geringfügigen Anlässen oft beliebt wird, eine Unsitte, die die Sprache mit einem ganz unnützen Ballast von Fremdwörtern beschwert.

Griechische Terminologie in der Seenkunde.

Sind diese Fremdwörter immer notwendig? Es kommt selten vor, daß ein Gedanke oder eine Thatsache nicht in den Ausdrücken der Umgangssprache wiedergegeben werden kann. Eine neue Wortbildung ist, auch wenn sie nicht unbedingt notwendig ist, zwar für den, der sie einführt, oft sehr bequem, für den Leser aber meist nur unnützer Ballast. In Fachkreisen mögen die meisten dieser Ausdrücke verstanden werden; im großen Publikum hingegen ist dies nicht mehr der Fall. Soll unsere schöne Wissenschaft nicht geradezu abschreckend wirken, so müssen wir vermeiden, sie durch zu zahlreiche Fremdwörter zu verunstalten. Man muß sich hüten, die limnologische Litteratur für die zahlreichen Leser, die sich für Seenforschung interessieren, durch Gebrauch von Fremdwörtern unverständlich zu machen.

Diese Befürchtungen, es möchte eine zu weitgehende Anwendung von Fremdwörtern in der Seenkunde von schädlichem Einfluß sein, dürften durch das hier folgende Verzeichnis der von verschiedenen Autoren gebrauchten

---

[1]) P. Pavesi, Altra serie di ricerche et studii sulla fauna pelagica dei Laghi italiani. Atti Soc. Venet.-Trent. Sc. Nat. VIII. 2. 1882.

technischen Ausdrücke ihre Begründung finden. Dasselbe wird, wie ich hoffe, jedem, der bei seinen Forschungen gewisse moderne naturwissenschaftliche Arbeiten zu lesen hat, von Nutzen sein. Doch möchte ich vor dem weitgehenden Gebrauch dieser Fremdwörter warnen und hierin weise Mäßigung dringend empfehlen.

Die größte Zahl dieser Fremdwörter ist ursprünglich zur Bezeichnung ozeanographischer Erscheinungen geschaffen und erst später auf die entsprechenden Erscheinungen der Seen übertragen worden. Die Namen der Autoren, die sie gebildet haben, übergehe ich mit Schweigen; das ist die einzige Strafe, die ich ihnen für ihre überhandnehmende Neigung zu griechischen Wortbildungen auferlegen kann. Die oft viel zu langen Definitionen der Autoren vereinfache ich so weit als möglich [1]).

I. Halobion. Die organischen Gesellschaften mariner Gewässer.
   Limnobion. Die organischen Gesellschaften süßer Gewässer.
   Geobion. Die organischen Gesellschaften des Festlandes.

II. Halolimnetisch. Das den Salzseen Eigentümliche.

III. Littoral. Zur Uferzone gehörend.
   Pelagisch. Zur Centralzone gehörend.
   Tief oder abyssal. Zur tiefen Zone gehörend.

Der Ausdruck limnetisch wurde zuerst vorgeschlagen, um den Ausdruck pelagisch zu ersetzen, den P. E. Müller und ich zur Bezeichnung der Erscheinungen der centralen Region des Sees eingeführt hatten. In diesem Sinne war die Bezeichnung klar. Später jedoch glaubten die Naturforscher Norddeutschlands die Organismen der littoralen und der pelagischen Region vereinigen zu müssen. Alle insgesamt wurden mit dem Ausdruck limnetisch bezeichnet. Wenn auch gewisse Seen, die eher als Teiche aufzufassen sind, keine Tiefe und daher auch keine eigentliche pelagische Region besitzen, so erscheint die Unterscheidung verschiedener Regionen in großen und tiefen Seen doch vollständig gerechtfertigt. Deswegen kann die Uebertragung des Wortes limnetisch auf die Gesamtheit der littoralen und pelagischen Regionen nicht gutgeheißen werden. Sie hat eine bedauerliche Ver-

[1]) Der Gleichmäßigkeit wegen habe ich alle diese Substantiva der Form des sächlichen Geschlechts angepaßt.

wirrung herbeigeführt. Das Wort limnetisch sollte verpönt sein oder nur gleichbedeutend mit lacuster gebraucht werden.

IV. Eupelagisch (eulimnetisch), das konstant in der pelagischen Region Vorkommende, in der pelagischen Region Einheimische.
Tychopelagisch (tycholimnetisch), das nur erratisch in der pelagischen Region Vorkommende.
Proschairolimnetisch, das zeitweise der limnetischen Region Angehörende.

V. Plankton, die Gesamtheit der passiv im Wasser treibenden Organismen.
Nekton, die sich aktiv fortbewegenden Wassertiere (Fische, Krustentiere).
Pleuston, Schwimmflora; Pflanzen, die leichter sind als das Wasser und infolgedessen an der Oberfläche schwimmen.
Benthon (Benthos), Organismen, die auf oder im Grunde leben und zu schwer sind, um aktiv zu schwimmen oder passiv zu treiben.

VI. Thalassoplankton, ozeanisches Plankton.
Limnoplankton, Seeplankton.
Potamoplankton, Flußplankton.
Heleioplankton, Sumpfplankton.
Kryoplankton, Schneeplankton.

VII. Sessiles Benthon, festsitzende Organismen des Benthon.
Vagiles Benthon, herumirrende Organismen des Benthon.
Nektonischer Benthon, schwimmende Organismen des Benthon.

VIII. Littorales Benthon, Organismen, die auf dem Grunde der littoralen Region leben.
Abyssales Benthon, Organismen, die auf dem Grunde der tiefen Region leben.

IX. Neritisches Plankton, Organismen, die an der Oberfläche der littoralen Region leben.
Ozeanisches Plankton, Organismen, die auf hoher See oder an der Oberfläche der pelagischen Region leben.

X. Pelagisches Plankton, Organismen der Oberflächenschichten des Ozeans.
Zonarisches Plankton, Organismen der mittleren Zone.
Bathybisches Plankton, Organismen der tiefen Zone.

XI. Autopelagisches Plankton, Gesellschaften, die fortwährend an der Oberfläche leben.

Bathypelagisches Plankton, Gesellschaften, die sich in täglichen Wanderungen von der Oberfläche in die mittleren Schichten begeben.

Spanipelagisches Plankton, Gesellschaften, die am Grund leben und nur selten an die Oberfläche kommen.

XII. Nyktipelagische Tiere kommen nachts an die Oberfläche.

Chimopelagische Tiere kommen im Winter an die Oberfläche.

XIII. Phytoplankton, Zooplankton.
Planktophyten, Planktozoën.
Phytobenthon, Zoobenthon.
Benthophyten, Benthozoën.
Phytopleuston, Zoopleuston.
Pleustophyten, Pleustozoën.

XIV. Pseudoplankton, Leichen und Ueberreste von Landorganismen, die in den See geschwemmt wurden und dort frei schwimmen.

XV. Meroplankton bei Häckel, periodisches Plankton bei Hensen, Plankton, das nur in gewissen Jahreszeiten auftritt.

Holoplankton, permanentes Plankton, fortdauernd auftretendes Plankton.

XVI. Monotones Plankton besteht zu 9/10 aus derselben Art.

Prävalentes Plankton ist zu mehr als der Hälfte aus derselben Art zusammengesetzt.

Polymiktes Plankton besitzt mehrere prädominirende Arten.

Pantomiktes Plankton besitzt keine prädominirende Art.

XVII. Euplankton, Organismen, die frei schwimmen.

Epiplankton, Organismen, die schwimmen, weil sie auf pelagischen Organismen festsitzen.

XVIII. Das Euplankton kann eingeteilt werden in:

Neidioplankton, Organismen, die Schwimmapparate besitzen.

Morphoplankton, Organismen, die infolge ihrer Gestalt schwimmen.

Kollaplankton, Organismen, die schwimmen, weil sie von gelatinösen Massen umgeben sind.

Hidroplankton, Organismen, die vermittelst eines Sekretes schwimmen.

Phlyktiplankton, Organismen, die durch hydrostatische Organe gestützt werden.

XIX. Das Morphoplankton kann eingeteilt werden in:

Raphidoplankton, nadel- oder spindelförmige Organismen.

Skaphoplankton, scheiben- oder schiffchenförmige Organismen.
Desmoplankton, zu Bändern vereinigte Organismen.
Kremastoplankton, Organismen, die mit Schwimmanhängseln, wie Nadeln, Stacheln, Haaren versehen sind.

XX. Das Hidroplankton kann eingeteilt werden in:
Elaioplankton, Organismen, die vermittelst fetter Massen schwimmen.
Gasoplankton, Organismen, die vermittelst Luftbläschen schwimmen.

XXI. Stenotherme Organismen verlangen eine gleichmäßige Temperatur.
Eurytherme Organismen sind wechselnden Temperaturen angepaßt.

XXII. Stenohaline Organismen leben in normal 3 bis 4 % Salz enthaltenden Lösungen.
Brackwasserorganismen leben in wenig salzigem Wasser.
Euryhaline Organismen sind wechselnder chemischer Zusammensetzung des Wassers angepaßt.

XXIII. Stenophotische Pflanzen verlangen eine konstante Beleuchtung.
Euryphotische Pflanzen sind wechselnden Lichtintensitäten angepaßt.

XXIV. Die diaphane Region ist beleuchtet.
Die aphotische Region ist dunkel.

3. Die littorale Region.

Die littorale Region, die wir als geographische Region (S. 27) charakterisiert haben, umfaßt in biologischer Hinsicht die gesamte Uferzone des Sees. Sie erstreckt sich bis an die äußerste Grenze des Vorkommens der strauchigen Wasserpflanzen (strauchartige Characeen und Phanerogamen) d. h. bis in eine von See zu See wechselnde Tiefe von 10—30 m. In ihrer Gesamtheit zeigt die Region bedeutende Unterschiede und läßt sich in zahlreiche Unterabteilungen zerlegen.

1. Der trockene Strand besteht aus dem Gürtel von Sand, Geröll, Mauern oder Felsen, der, meist außerhalb des Sees gelegen, denselben umgibt und nur bei Sturm vom Wellenschlag getroffen wird. Die Abwesenheit von erdigen oder schlammigen Bestandteilen charak-

terisiert ihn scharf. Seine Bewohner sind Felsen- oder Sandpflanzen, welche die feuchte Seeluft nicht scheuen, ferner einige Tiere, die sich von den durch die Wellen auf den Sand geworfenen Organismen und Ueberresten nähren, Vögel, Insekten und Spinnen.

Der trockene Strand gehört nicht zur aquatischen Region, sondern zum Festland. Er hat daher mit dem See selbst direkt nichts gemein; allein seine Entstehung hängt vom See ab; ohne See würde er nicht existieren. Eine ganz analoge Bildung ist der trockene Strand der Flüsse und Wildbäche.

2. Der überschwemmbare Strand umfaßt diejenige Zone der Uferregion, die bei Hochwasser überschwemmt ist, bei Niederwasser aber trocken liegt. Seine Bewohner sind einerseits Wasserpflanzen, welche die bei Niederwasser regelmäßig wiederkehrenden Zeiten der Trockenheit aushalten können (Hippuris, Ranunculus aquatilis, Acorus, Callitriche, Typha, Iris sibirica, I. pseudacorus, Sparganium ramosum etc.); andererseits sind es aber auch Landpflanzen, die den periodisch sich wiederholenden Ueberschwemmungen widerstehen können (Phragmites, Scirpus, Heleocharis, Carex, Juncus, Littorella, Ranunculus reptans, Arenaria gothica, Polygonum hydropiper, P. amphibium etc.).

Bei Niederwasser wird der überschwemmbare Strand durch die Tiere des trockenen, bei Hochwasser durch die Tiere des untergetauchten Strandes belebt.

Je nachdem die Küste mehr oder weniger gegen die Brandung der Wellen geschützt ist, ist der überschwemmbare Strand kiesig, sandig oder schlammig. In direkter Abhängigkeit von diesen Verhältnissen wechselt die Zusammensetzung der biologischen Gesellschaften von Strand zu Strand.

3. Der untergetauchte Strand, dessen steiniger oder sandiger Boden fortwährend dem Wellenschlag ausgesetzt ist, beherbergt an Pflanzen nur festsitzende Algen, (Ulothrix, Cladophora) und an Tieren nebst denjenigen des Littorals, die sich auf ihrer Jagd nach Nahrung

dahin verirren, nur solche Wassertiere, die, unter Steinen versteckt, dem Anprall der Sturmwellen widerstehen können.

4. Die Aestuare. Die Mündungen der Flüsse, in die das Wasser des Sees bei Hochwasserstand eindringt, werden zu größeren oder kleineren Aestuaren. In biologischer Hinsicht sind sie dem Einfluß des Sees sowie dem des Flusses ausgesetzt. Ihre Bevölkerung kann ein Gemisch von fluviatilen und lacustren Gesellschaften darstellen. Bei günstigen lokalen Bedingungen vermögen sich die mit Wurzeln versehenen Pflanzen des Flusses bis in das Gebiet des Sees hinauszuwagen; die schwimmenden Algen, die Tiere des Flusses, gelangen in das stehende Wasser des Mündungstrichters oder bis in den See selbst. Umgekehrt können lacustre Organismen auch in den Mündungstrichter eindringen, sei es durch aktive Migration, indem sie, gegen den Strom schwimmend, bis in den Fluß hinaufsteigen (fluvio-lacustre wandernde Fische), sei es durch passive Migration, indem sie durch Gegenströmungen in das Aestuar gelangen. Die Bevölkerung der Mündungstrichter ist daher gemischt. Je nach der Jahreszeit und den örtlichen Bedingungen herrscht bald das lacustre, bald das fluviatile Element vor.

5. Die Lagunen sind littorale Teiche, die, im gleichen Niveau mit dem See liegend, von diesem durch eine Nehrung *(Lido)* getrennt sind. Ihre Bevölkerung entspricht derjenigen der Teiche und Sümpfe. Sie unterscheidet sich von derjenigen der Seen genau so scharf wie die lacustren Gesellschaften von den palustren. Bei Hochwasser kann die Nehrung überschwemmt werden. Häufig existiert zwischen Lagune und See ein Kanal, durch den bei Hochwasser sogar passive Migrationen der im See lebenden Organismen stattfinden können. So kann sich die palustre Bevölkerung der Lagune mit den Tieren und Pflanzen des Sees vermischen. Die Lagune steht mit dem See in biologischer Hinsicht in direktem Zusammenhang.

6. Die Uferbank. Sämtliche bis jetzt aufgeführten

Regionen und Subregionen gehören nur teilweise oder zeitweise dem See an. Man könnte sie als dem See zugewandte Regionen bezeichnen. Erst die Uferbank führt uns in das eigentliche Gebiet des Sees; hier finden wir auch wirklich echt lacustre biologische Gesellschaften.

Die Uferbank ist die littorale Region des Sees im engeren Sinne, d. h. die durch den steten Wellenschlag ausgebildete Terrasse, die den See ringsum begrenzt. Sie bleibt stets, auch bei niederstem Wasserstande, unter Wasser. Die Wassertiefe über ihr beträgt in den größten centraleuropäischen Seen im Minimum 1 m, im Maximum 6 m. Sie ist von der Größe des Sees, vom Wellenschlage, dem der betreffende Punkt ausgesetzt ist, und von der Größe der jahreszeitlichen Schwankung des Wasserstandes abhängig. Im allgemeinen ist die Uferbank ziemlich horizontal. Landwärts wird sie durch den Strand, seewärts durch die Halde des Seebeckens begrenzt.

Zur Uferbank gehören in biologischer Hinsicht auch die kiesigen Böschungen der Flußdeltas und die natürlichen felsigen Böschungen des Sees, wenigstens in ihrem oberen littoralen Teile, soweit sie nicht durch Alluvionen modifiziert sind. Ihrem Ursprung und ihrer petrographischen Natur nach sind sie von der Uferbank gänzlich verschieden; in biologischer Hinsicht weisen sie jedoch dieselben Bedingungen auf wie jene.

Im allgemeinen werden die Lebewesen der Uferbank von folgenden Faktoren beeinflußt:

a) Von der Natur des Grundes, der felsig, steinig, sandig oder schlammig sein kann.

b) Von den Bewegungen des Wassers, Wellenschlag und Strömungen. Diese Bewegungen können, wenn auf dem See ein auflandiger Sturm herrscht, sehr heftig werden. Die Wellen rollen mit unwiderstehlicher Gewalt über die Uferbank; die Rücklaufströmungen sind heftig. Das Auftreten von Wellenfurchen (Ripplemarks) zeigt, daß sogar der Grund der Uferbank durch den Wellenschlag in Mitleidenschaft gezogen wird.

c) Von der Temperatur des Wassers, die im Bereich der Uferbank stark schwankt. Das Wasser nimmt hier

nicht nur an den gewöhnlichen jahreszeitlichen und täglichen Temperaturschwankungen des Sees teil, sondern diese Schwankungen sind gerade hier wegen der geringen Tiefe des Wassers besonders groß, da in der kalten Jahreszeit die littoralen Gewässer kälter, in der warmen hingegen wärmer sind, als die pelagischen. Die Differenz kann mehrere Grade nach der einen wie nach der anderen Richtung betragen.

d) Das Wasser der Uferbank ist sehr stark erleuchtet. Bei nur einigen Metern Wassertiefe ist die Absorption des Lichtes gering; das Licht dringt wenig geschwächt bis auf den Grund.

e) Die Durchsichtigkeit des Wassers ist bedeutenden Schwankungen unterworfen. Im allgemeinen sind die littoralen Gewässer mannigfachen Verunreinigungen ausgesetzt und daher nicht so klar wie die pelagischen. Wird der Schlamm und Sand der Uferbank durch landwärtsrollende Wellen aufgerührt, oder führen Strömungen die schlammbeladenen Gewässer eines Zuflusses herbei, so wird das Wasser getrübt und undurchsichtig. Die Sichtbarkeitsgrenze kann alsdann manchmal nur wenige Decimeter tief liegen.

f) Daraus ergibt sich, daß organische und mineralische Schlammteilchen im Wasser der Uferbank im Ueberfluß vorhanden sind, und daß sowohl Pflanzen als Tiere darin reichliche Nahrung finden können. Ferner darf nicht vergessen werden, daß die Uferbank wegen ihrer Lage zunächst dem Festland die Hauptablagerungsstätte der durch die Winde seewärts verschleppten atmosphärischen Staubteilchen ist. Diese Staubteilchen bilden eine nicht zu unterschätzende Quelle von Nährstoffen.

g) In chemischer Hinsicht ist die Zusammensetzung des littoralen Wassers gleich derjenigen der übrigen Teile des Sees. Seine Lage dicht am Ufer bedingt aber, daß es durch das Wasser der Zuflüsse, Bäche und Abflußkanäle der menschlichen Siedelungen leicht verunreinigt werden kann. Einerseits finden die Lebewesen an solchen Stellen sehr reichlich Nahrung; andererseits aber können die Abflußkanäle auch schädliche Substanzen mit sich führen

und dadurch auf die Organismen tödlich einwirken. Es läßt sich dies in den Seen, deren nähere Umgebung gewisse Fabriken besitzt, beobachten.

Fassen wir die Lebensbedingungen kurz zusammen, die die Uferbankzone in biologischer Hinsicht aufweist: Die Lebensbedingungen sind hier von Ort zu Ort äußerst verschieden und starken Schwankungen unterworfen; die gesamte Region ist relativ starken Wellenbewegungen, sowie chemischen, physikalischen und mechanischen Reaktionen ausgesetzt; Nahrung ist sowohl in gelöster, als auch in suspendierter Form im Ueberfluß vorhanden.

Diese Verhältnisse ermöglichen die Existenz zahlreicher sehr verschiedener tierischer und pflanzlicher Gesellschaften. Sämtliche Wassertiere, sowie sämtliche Pflanzen, die dem Wellenschlag zu widerstehen vermögen, siedeln sich an und gedeihen. Die littoralen Floren und Faunen sind sehr reich und stark gegliedert.

Folgende aus den allgemeinen Lebensbedingungen des Mediums sich ergebende Charaktere sind den littoralen Organismen eigen:

1. Eine bedeutende mechanische Widerstandsfähigkeit, die sie befähigt, dem zerstörenden Einfluß starker Stürme zu widerstehen. Das gilt von den festsitzenden Organismen, aber auch von den freilebenden. Diese können sich während des Sturmes in Schlupfwinkeln in Sicherheit bringen.

2. Eine große Widerstandsfähigkeit gegen thermische Schwankungen; entweder paßt sich der Organismus den verschiedensten Temperaturextremen an, oder er entwickelt Dauerzustände, wie Samen, Sporen, Eier, Cysten, Larven, vermittelst deren er dem zerstörenden Einfluß der schlechten Jahreszeit widersteht.

3. Sehr starke Pigmentierung, wie sämtliche der mächtigen Einwirkung der Sonnenstrahlen ausgesetzte Organismen.

Die große Verschiedenheit des Bodens der Uferbank, je nach dem Ort, gibt zu sehr verschiedenen Gruppierungen der Organismen Anlaß. Wir können folgende Facies unterscheiden:

a) Facies der Felsen. Die vertikalen und horizontalen Flächen der Felsen, die von Menschenhand gebauten Mauern, Quaimauern, Hafendämme, Pfähle dienen dem „Algenteppich“ als Unterlage. Ulothrix-, Cladophora-, Oscillaria-Arten bilden hier einen sammetartigen, mehr oder weniger fadigen Ueberzug, der bei starkem jugendlichen Wachstum der Chlorophyllalgen grün erscheint, später aber, wenn die überhandnehmenden Diatomeen ihn bedecken, bräunlich wird. Ausnahmsweise können auch einige Moose, Fontinalis etc. an dieser Teppichbildung teilnehmen. Von Tieren finden sich die Larven der Neuropteren, die hier ihre seidigen Galerien bauen, kriechende Gasteropoden, Mollusken, Limneen und Spongien, die sich zu lichenoiden Platten ausbreiten.

b) Facies des groben Gerölls. Die unter Wasser befindlichen Anhäufungen von Steinen, z. B. Reste von ehemaligen durch das Wasser zerstörten Moränen, eines alten Strandes, von alten Pfahlbauten oder auch künstlichen Anhäufungen, sind der Sitz einer überaus reichen Bevölkerung. Die Steine sind mit einem, demjenigen der Mauern und Felsen entsprechenden Algenteppich bedeckt; an einzelnen Stellen oder in gewissen Seen sind sie durch die Tuffbildungen der inkrustierenden Algen, Rivularien wie Euactis calcivora, Hydrocoleum calcilegum, mit einer millimeter-, ja sogar bis centimeterdicken Schicht überzogen.

Im Algenteppich leben und kriechen eine Menge von Vertretern sämtlicher aquatischer Typen: Insektenlarven, Hydrachniden, Crustaceen, Mollusken, Bryozoen, Würmer etc. Dazu gesellen sich alle freilebenden ubiquistischen, d. h. überall auftretenden Tiere, die in der littoralen Region umherschweifen, wie Entomostraken, Rädertierchen und Protozoen.

Im allgemeinen besteht das grobe Geröll aus nebeneinanderliegenden, auf Schlamm oder Sand ruhenden Steinen, die ein mehr oder weniger zusammenhängendes Pflaster bilden. Zwischen und unter den Steinen leben

arenicole und limicole Gesellschaften. Im groben Geröll mischen sich daher diese mit den saxicolen Tieren.

Die Fauna des groben Gerölles ist bedeutend reicher als diejenige der Mauern und Felsen, weil die freilebenden Tiere unter den Steinen Schlupfwinkel finden oder konstruieren, in denen sie sowohl gegen starke Wellen, als auch gegen Feinde Schutz finden.

c) Facies des Sandes. Wo reiner Sand, dessen einzelne Körner nicht in Schlamm eingebettet sind, in der Uferbank auftritt, dort treffen wir die ärmste Region. Tierische und pflanzliche Organismen finden allem Anschein nach hier die ihnen notwendigen Lebensbedingungen kaum oder gar nicht. Festwurzelnde Pflanzen fehlen gewöhnlich[1]). Warum? Ausnahmsweise kann sich bei ruhigem Wetter ein organischer, aus Diatomeen bestehender Filz entwickeln. Hie und da verirren sich einzelne Borstenwürmer oder Dipterenlarven, lamellibranche Mollusken, Anodonten, Unio, Cyclus oder Pisidien in den Sand. Im allgemeinen kann jedoch das Gebiet des Sandes der Uferbank als beinahe steril bezeichnet werden.

d) Facies des Schlammes. Ganz andere Verhältnisse finden sich dort, wo die Uferbank schlammig ist. Ihre aus anorganischen staubfeinen Teilchen bestehenden Massen sind mit mehr oder weniger zersetzten organischen Substanzen gemengt und bilden eine breiige Masse. Die wurzeltreibenden Phanerogamen, Potamogeton, Ceratophyllum, Myriophyllum, bilden dichte Bestände, die man geradezu als unterseeische Wälder bezeichnen kann. Die dünnen, biegsamen, geschmeidigen Triebe dieser krautartigen, oft meterhohen, mannigfach verzweigten, mit linealen Blättern versehenen Pflanzen bilden einzelne Büsche, die durch Lichtungen getrennt, sich für das Auge des Eingeweihten zu oft

[1]) Die Wurzeln der Wasserpflanzen scheinen keine bedeutende Rolle im Leben derselben zu spielen. Sie können des Humus voll entbehren. Man sollte daher glauben, daß die festsitzenden Wasserpflanzen, die, bei uns wenigstens, sämtlich unterirdische Rhizome besitzen, genügend lange Wurzeln zu treiben vermöchten, um sich auch im beweglichsten Sande fest zu verankern.

wunderbaren Landschaftsbildern gruppieren. Die Mehrzahl dieser Pflanzen ist nur in ihren Rhizomen oder vermittelst Winterknospen ausdauernd. Die aquatischen, blättertragenden Triebe sind meistens einjährig und entwickeln sich im Frühling mit wunderbarer Schnelligkeit. Im Herbst sterben sie ab, verwesen und sammeln sich auf dem Schlamm als wahrer Composthaufen an, wenn sie nicht durch die Rücklaufströmungen der Sturmwellen in den See hinausgeführt oder durch den Wellenschlag auf den Strand geworfen werden. Die Characeen bilden ein dicht verflochtenes, undurchdringliches Gestrüpp von einigen Decimetern Höhe. Der gesamte Wald trägt als Epiphyten zahllose Algen, so insbesondere Diatomeen. Auf diesen Pflanzen siedeln sich vorübergehend oder dauernd Myriaden von Tieren an: Insekten, Hydrachniden, Crustaceen, Mollusken, Bryozoen, Würmer, Rädertierchen, Protozoen schwärmen dicht durcheinander. Dies ganze organische Leben ist äußerst intensiv und mannigfaltig wechselnd.

e) Facies des Schlicks. An geschützten Stellen, wo ein mit organischen Substanzen beladener Zufluß, z. B. eine Dohle, ein Spülbach einmündet, wird der Schlamm zum Schlick. Schwärzliche Farbe und durchdringender ekelhafter Geruch zeichnen ihn aus. Er ist der Sitz lebhafter Gärungsprozesse, bei denen reichliche Massen von Sumpfgasen und Schwefelwasserstoff entstehen. Die biologischen Gesellschaften entsprechen denjenigen des Schlammes. Hervorgehoben sei das Vorherrschen der chätopoden Würmer und der Dipterenlarven. Die aus grünen Algen bestehenden Ueberzüge der Steine, Mauern, Pfähle werden in der Nähe einer Dohle durch Schizomyceten, wie Sphaerotilus, Cladothrix etc. ersetzt. Sie bilden weißliche sammetartige Ueberzüge, die den grünen Ulothrixteppichen der reinen Gewässer entsprechen.

f) Facies der Häfen. Die natürlichen und künstlichen, durch Vorgebirge oder Molen geschützten Häfen können als Abart der Uferbank betrachtet werden. Der Wellenschlag wirkt hier nur ganz schwach; selbst zarte Pflanzen vermögen ihm zu widerstehen. Das Wasser er-

neuert sich schwerer und langsamer, als an einem offenen Ufer. Das Wasser ist sehr oft durch gelöste organische Substanzen stark verunreinigt, der Boden oft schlickig. Der letztere dient außer den Vertretern der littoralen Lebewelt auch einer Anzahl von Phanerogamen, die von der dem Wellenschlag ausgesetzten Uferbank ausgeschlossen sind, als Zufluchtsstätte. Dahin gehören die Nymphaeaceen, Batrachiumarten (Ranunculus aquatilis), Elodea canadensis etc., die hier, vor stürmischem Wellenschlag geschützt, üppig gedeihen.

g) Facies der Halde. Außerhalb der Uferbank senkt sich die Seehalde zur Tiefe; in biologischer Hinsicht kann sie gleichsam als eine Subregion der Uferbank aufgefaßt werden. Der Boden der Halde besteht aus feinem, mehr oder weniger schlammigem Sande. Die Tiefe des Wassers ist zu groß, um die Existenz von Phanerogamen zu ermöglichen, deren Blütenstengel bis über die Wasseroberfläche sich verlängern müssen. Die Characeen hingegen gedeihen hier am üppigsten. Ihr dicht verflochtenes Strauchwerk beherbergt eine reiche Fauna. Insbesondere finden sich hier die gasteropoden Mollusken in großer Menge, Limneen, Bythineen, Valvaten etc.

Damit haben wir die in biologischer Hinsicht in Betracht kommenden hauptsächlichsten Unterabteilungen der Uferbank der Reihe nach geschildert. Es mögen dieselben in gewissen Seen unter besonderen Umständen spezifische Eigenheiten zeigen. Auf diese können wir hier in unserer allgemeinen Seenkunde nicht eingehen; wir müssen deren Schilderung der monographischen Beschreibung der einzelnen Seen überlassen.

Die Lebensbedingungen des Seelittorals im Gegensatz zu denjenigen anderer süßer Wassermassen können wie folgt zusammengefaßt werden:

a) Im Gegensatz zum fließenden Wasser der Flüsse ist das Wasser der littoralen Region relativ ruhig.

b) Im Gegensatz zum Wasser der Sümpfe wird es durch Wellen und Strömungen fortwährend erneuert.

c) Bei Sturm ist es sehr heftigen und mächtigen mechanischen Einwirkungen ausgesetzt.

d) Im Gegensatz zu den unterirdischen Gewässern ist es stark erleuchtet.

Eine gewisse Anzahl von palustren, fluviatilen und unterirdischen Gesellschaftsformen sind durch diese Eigenheiten von der Uferbank ausgeschlossen; dennoch beherbergt sie die Mehrzahl der für Süßwasser charakteristischen Formen. Dank der so verschiedenen und wechselvollen Lebensbedingungen, die die Uferbank in ihren Subregionen bietet, wird die littorale lacustre Gesellschaft überhaupt zum ausgezeichnetsten Typus der Süßwasser bewohnenden Gesellschaften.

4. Die Tiefenregion

umfaßt die Sohle des Sees und die ihr unmittelbar aufgelagerten, unterhalb der Grenze der littoralen Region liegenden Wasserschichten. Sie wird landwärts durch das Auftreten von grünen Pflanzen in einer Tiefe von ca. 10—25 m begrenzt und erstreckt sich demnach auch über die sämtlichen Hänge des Seebeckens. Außer an den wenigen Stellen, wo am Gehänge des Beckens Fels zu Tage tritt, d. h. wo dasselbe mehr als 40° Neigung hat, so daß Alluvionen nicht haften können, besteht der Boden der tiefen Region überall aus sehr feinem Schlamm, der nur in der Nähe der Küste einzelne Sandkörner enthält. Diese Alluvionen bestehen aus den durch die Zuflüsse und den Wellenschlag herbeigeschleppten Trümmerteilchen, die, aus den verschiedensten Gegenden des Einzugsgebietes stammend, eine sehr komplexe mineralogische Zusammensetzung haben. Meist stellt sich der Schlamm als ein Gemenge von kalkigen und kieseligen Bestandteilen dar. Seine Zusammensetzung ist nur in Ländern von sehr gleichförmiger geologischer und petrographischer Natur einfach. Gröberes Material tritt nur ganz ausnahmsweise auf. So kann bei Hochwasser grobes fluviatiles Geröll vor der Flußmündung auch in größere Tiefe verschleppt werden und sich hier

absetzen oder die normalen Seealluvionen können durch eine Uferrutschung mit Geröll bedeckt werden.

Die Lebensbedingungen in dieser Tiefenregion sind kurz die folgenden:

a) Großer hydrostatischer Druck, der mit je 10 m Tiefe um eine Atmosphäre zunimmt.

b) Beinahe vollständige Unbeweglichkeit des Wassers. Die Wellen üben keinen direkten Einfluß mehr aus; einzig die Strömungen machen sich noch bemerkbar. Zu schwach um Schlamm aufzurühren, sind sie doch stark genug, um Organismen und Keime, die im Wasser suspendiert sind, zu verfrachten.

c) Niedere und fast konstante Temperatur. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Amplitude der Temperaturschwankung ab. Die täglichen Schwankungen hören schon in den obersten Schichten der tiefen Zone auf; die jährlichen pflanzen sich bis zu etwa 100 m Tiefe fort. Einzig die cyklischen Schwankungen dringen bis in die größten Tiefen vor; allein ihre Amplitude ist sehr gering und übersteigt selten 1—2°. In den großen Tiefen der temperierten Seen schwankt die Temperatur um 4° herum, in den polaren Seen ist sie stets etwas unter 4°, in den tropischen übertrifft sie diese Temperatur mehr oder weniger.

d) Die oberen Schichten sind noch schwach erleuchtet; in den unteren fehlt jede Spur von Licht.

e) Das Wasser des Sees ist an den Gehängen des Beckens vollständig durchsichtig, ausgenommen etwa vor der Mündung eines Flusses, dessen Gewässer durch Schlamm getrübt sind. Das trübe Wasser folgt auf seinem Wege zu den größten Tiefen der Linie größten Gefälls. Trübung tritt auch dort ein, wo Sturmwellen den Schlamm der littoralen Gewässer aufrühren und so deren Dichte vermehren, so daß dieses Wasser nun abwärts dem Gehänge entlang zur Tiefe sinkt. Dem Wasser der centralen Ebene des Sees werden dieser Art fluviatile und littorale Wassermassen zugeführt, deren Dichte infolge der suspendierten Bestandteile größer ist, als diejenige der dichtesten Wassermassen des Sees. Dieses trübe Wasser sammelt sich in

der tiefsten Tiefe an; das Wasser unmittelbar über der centralen Ebene ist deßhalb meistens trüb.

f) Die chemische Zusammensetzung des Wassers der Tiefenregion. An den Gehängen findet sich Seewasser, unmittelbar an der Sohle dagegen ein variables Gemisch der schweren fluviatilen und littoralen Gewässer mit Seewasser. Der Gehalt an gelösten organischen Substanzen ist derselbe wie in den übrigen Teilen des Sees; der Gehalt an gelösten Gasen entspricht beinahe demjenigen des Oberflächenwassers (s. oben S. 90 ff.).

g) Die zur Ernährung der Organismen geeigneten Fremdkörper können auf zwei verschiedene Weisen in die Tiefe des Sees gelangen: Zufällig und ganz unregelmäßig durch die thermischen, mechanischen und hydrostatischen Convektionsströmungen, die das mit schwebenden organischen und mineralischen Bestandteilen beladene Wasser des Littorals, der Oberfläche und der Zuflüsse in die Tiefe führen; dann aber auch ganz regelmäßig und andauernd durch die hydrostatische Migration der abgestorbenen pelagischen Organismen, deren Leichen infolge ihrer Schwere durch die mittleren Schichten des Sees hindurch bis auf die Sohle sinken. Nach der Anzahl der im Schlamm der tiefen Region eingeschlossenen Reste pelagischer Organismen zu schließen, ist diese Nahrungsquelle sehr ausgiebig.

Die Lebensbedingungen in der tiefen Region sind kurz zusammengefaßt: Beinahe absolute Ruhe in Bezug auf mechanische, vibratorische und molekulare Einwirkungen. Die ganze Region ist ruhig, kalt und dunkel. Sehr einförmige, kleinen oder höchst geringen Schwankungen unterworfene Lebensbedingungen. Es existiert wahrscheinlich auf dem Erdenrund keine zweite von Lebewesen bewohnte Region, in der so vollständige Ruhe und gleichmäßige Lebensbedingungen herrschen. Bedeutende Zufuhr von Nährstoffen; die zur Atmung nötigen Gase sind in genügender Menge vorhanden.

Charakteristisch ist ferner die Abwesenheit von festen Körpern, auf denen feste Sitze verlangende Pflanzen und Tiere sich niederlassen könnten; nur ausnahmsweise

finden sich in der tiefen Region Steine, die aus Transportschiffen gefallen oder von Eisschollen hergeführt sind, oder Baumstämme und Wurzeln, die, durch Strömungen in die pelagische Region hinausgeschwemmt, sich schließlich mit Wasser vollsaugten und untersanken.

Trotz der Kümmerlichkeit und der Armut des Mediums lebt in der tiefen Region eine biologische Gesellschaft, die in vielen Beziehungen bemerkenswert ist. Grüne Pflanzen sind nicht vorhanden, da unserer Definition gemäß das äußerste Vorkommen chlorophyllhaltiger Pflanzen die Grenze zwischen der littoralen und der Tiefenregion abgibt. Als einzige und bis jetzt unerklärt gebliebene Ausnahme von dieser Regel sei das Vorkommen von Thamnium Lemani (J. B. Schnetzler) erwähnt, eines merkwürdigen Mooses, das ich in voller Entwickelung auf der unterseeischen Moräne von Yvoire im Genfer See bei 60 m Tiefe gefunden habe. Auf den Hängen bis zu 80 und 100 m Tiefe findet sich eine spärliche Algenvegetation von Oscillarien und Palmellaceen. Die Diatomeen hingegen treten hier in großer Anzahl und in sehr verschiedenen Gruppierungen auf. Die Oberflächenschicht des Schlammes, auf dem diese Organismen leben, zeigt eine bemerkenswerte Konsistenz; sie ist ziemlich kohärent und läßt sich vermittelst einer Pincette in Gestalt von Schuppen abheben. Sie bildet einen relativ festen Teppich von sammetbrauner Farbe, auf dem die tierischen Organismen sich bewegen und festsetzen können. In der Jahreszeit in der das Wasser klar ist, reicht sie tiefer hinab. Sie scheint also doch an die Einwirkung des Lichtes gebunden zu sein. Wir bezeichnen diese Schicht mit dem Ausdruck „organischer Filz“. Ihre obere Lage besteht aus Palmellaceen, Chroococcaceen und Myriaden von Diatomeen. Die Diatomeen der oberen Zone der tiefen Region sind dieser letzteren nicht eigen. Sie entstammen der littoralen Region und sind von dort zufällig verschleppt worden. Durch einen vom Lande her wehenden Wind werden sie in den offenen See hinausgetrieben, sinken hier in die Tiefe. Dort vegetieren sie weiter, wenn sie nicht etwa tiefer sinken

als die erleuchteten Schichten, in denen allein ihre Ernährungsfunktionen noch möglich sind. Im Sommer, wenn das Wasser relativ undurchsichtig ist, verschwinden sie wahrscheinlich vollständig.

So erklärt sich die veränderliche und verschiedene Zusammensetzung der oft sehr mannigfaltigen Diatomeenflora des organischen Filzes der Tiefenregion. Die Konsistenz des organischen Filzes wird durch die Fäden der Oscillarien bedingt. Dieser Filz ist übrigens nicht auf die Tiefenregion beschränkt, sondern kann auf der Uferbank, auf der Sohle von Teichen und Flüssen, kurz überall, wo niedere Algen vegetieren, beobachtet werden. Die Gruppierung der ihn zusammensetzenden Arten wechselt aber von Ort zu Ort; in den großen Tiefen gewisser Seen, deren Schlamm äußerst weich und kreidig ist, fehlt er.

Im Gegensatz zu der armen Flora der Tiefenregion ist die Fauna relativ reich zu nennen. Die Mehrzahl der limicolen Typen besitzt auch hier Vertreter, so die im Schlamme lebenden Tiere (Dipterenlarven, Chaetopoden, Nematoden, lamellibranche Mollusken [Pisidien]), die auf dem Schlamm laufenden oder kriechenden Tiere (Limneen und Valvaten), Hydrachniden, die schwimmenden oder vielmehr springenden, hüpfenden Tiere, die zwar nicht im Wasser schwebend schwimmen können, sich aber an der Oberfläche des Schlammes frei fortbewegen (Crustaceen, Amphipoden, Isopoden, Cladoceren, Copepoden, Ostracoden, Turbellarien, Strudelwürmer, Infusorien und Rhizopoden). Die Fauna der Tiefenregion setzt sich aus etwa 50—100 Arten zusammen, die den verschiedenen lacustren Tiergruppen angehören.

Die Formen der Tiefenregion sind klein, schwach, verkümmert, schlecht pigmentiert, oft blind. Sie entsprechen dem ruhigen, bewegungslosen, nicht veränderlichen Charakter des Mediums.

Im Abschnitt über den Ursprung der lacustren Faunen und Floren werden wir sehen, wie die Organismen der Tiefenregion dahin gelangt sind. Für den Augenblick begnügen wir uns zu konstatieren, daß diese

Formen sich fortpflanzen und vermehren. Von den meisten haben wir Eier, Cysten, Larven oder Jugendzustände gefunden. Diese Formen sind also definitiv angesiedelt und dürfen nicht als erratisch aufgefaßt werden. Wir dürfen daher mit voller Berechtigung von einer Tiefenfauna sprechen.

In der Tiefenregion des Sees fehlen merkwürdigerweise einzelne Typen, die in der littoralen Region weit verbreitet sind. Die Konstatierung ihrer Abwesenheit ist schwierig, da sie sich nur auf negative Beobachtungen stützt. Ein einziger glücklicher Zug kann die Resultate von zahlreichen früheren Fängen aufheben. Wir sind jedoch überzeugt, keinen Irrtum zu begehen, wenn wir die Abwesenheit von Spongillen und Najaden in der Tiefenregion des Genfer Sees behaupten. Diese Thatsache ist um so bemerkenswerter, als die Spongillen in den Tiefenregionen des Ozeans sehr häufig sind und als die Najaden Schlammbewohner sind, die auf dem Boden der tiefen Regionen des Sees ausgezeichnete Lebensbedingungen finden sollten.

5. Die pelagische Region [1]).

Die pelagische Region umfaßt die gesamte Wassermasse des offenen Sees mit Ausschluß des Uferwassers und des Wassers der Tiefenregion. Sie reicht von der Oberfläche weit hinab in die Tiefe, doch ohne mit dem Boden des Sees in direkte Berührung zu treten.

---

1) Ich ziehe den Ausdruck pelagisch der von Häckel vorgeschlagenen Bezeichnung limnetisch vor. Der Ausdruck pelagisch (von πέλαγος = das offene Meer im Gegensatz zum littoralen Meer) ist zuerst von E. P. Müller eingeführt worden und wird seit mehr als 25 Jahren unbeanstandet gebraucht, um die centrale obere Region des Sees mit Ausschluß der Tiefenregion zu bezeichnen. Der Ausdruck hat niemals zu Zweideutigkeiten Anlaß gegeben. Ist es nötig, so kann man leicht durch Beifügung erklärender Adjektiva Klarheit schaffen, indem man zwischen marin-pelagischen und süßwasser-pelagischen Organismen unterscheidet. Limnetisch ist der griechische Ausdruck für lacuster, der alles bezeichnet, was mit dem See in Beziehung steht. Nur durch eine restriktive Definition des Wortes „limnetisch" ist dessen Sinn auf die pelagische Region der Seen übertragen worden. Ein solcher Neologismus, für den keine Notwendigkeit vorliegt und der dazu noch einer besonderen Erklärung bedarf, muß als lästige Ueberladung einer an sich schon verwickelten wissenschaftlichen Ausdrucksweise bezeichnet werden. Limno-pelagisch wäre besser gewesen.

Die hauptsächlichsten Lebensbedingungen in diesem Medium sind:

a) Beinahe völlige Abwesenheit von Anheftungsstellen. Nur auf einzelnen Bruchstücken von Pflanzen oder tierischen Leichen, die im offenen See treiben, finden sich festsitzende, meist erratische Organismen.

b) Völlige Abwesenheit von Schlupfwinkeln, die den Tieren gestatten würden, sich vor ihren Verfolgern zu verstecken.

c) Ruhiges Wasser. Wenn auch die Oberfläche durch Wellen in Bewegung erhalten wird, so hört diese doch schon bei einer Tiefe von einigen Metern vollständig auf; hier herrscht ununterbrochen in der ganzen Wassermasse beinahe absolute Ruhe.

d) Geringer hydrostatischer Druck an der Oberfläche. Mit je 10 m nimmt der Druck um eine Atmosphäre zu.

e) Intensive Erleuchtung der Oberfläche, die mit zunehmender Tiefe abnimmt; in den tiefen Schichten herrscht relative oder absolute Dunkelheit.

f) Große Durchsichtigkeit des Wassers; nur ausnahmsweise wird dasselbe an der Oberfläche durch leichtes Flußwasser verunreinigt.

g) In den oberen Schichten im Laufe des Tages und des Jahres wechselnde Temperatur. Die Intensität der Schwankungen nimmt mit wachsender Tiefe ab; in den tiefsten Schichten schwankt die Temperatur das ganze Jahr um 4° herum. Seen in kalten Ländern frieren im Winter an der Oberfläche zu.

h) Konstante chemische Zusammensetzung des Wassers in den mittleren und tiefen Schichten des Sees. Nur hie und da wird die Zusammensetzung des Wassers der Oberfläche durch Beimengung von Flußwasser oder Regenwasser etwas verändert.

i) Armut an Nährstoffen, außer an der Oberfläche, auf der sich atmosphärischer Staub und vom Lande stammende Materialien aller Art finden, die durch Strömungen oder Winde verschleppt worden sind.

In diesem Medium und unter diesen Lebensbedingungen

lebt eine interessante, aus nur wenigen, aber in zahllosen Exemplaren vertretenen Typen bestehende biologische Gesellschaft, deren Individuenzahl groß genug ist, um eine bedeutende Rolle in der Oekonomie des Sees zu spielen. Diese Typen finden sich in den oberen Schichten der Region, von der Oberfläche bis zu etwa 100 oder 200 m Tiefe.

Ich lasse hier nach Apstein[1]) ein Verzeichnis der Genera folgen, die in der pelagischen Flora und Fauna der norddeutschen Seen vertreten sind:

Pflanzen.

Schizophyceae:	Chroococcaceae.	Clathrocystis, Microcystis, Merismopedia.
	Nostocaceae.	Anabaena, Aphanizomenon.
	Rivulariaceae.	Gloiotrichia.
Diatomeae:	Melosireae.	Melosira.
	Fragilarieae.	Fragilaria, Asterionella, Synedra.
	Diatomeae.	Diatoma.
	Chaetocereae.	Atheia, Rhizosolenia.
Chlorophyceae:	Desmidiaceae.	Staurastrum.
	Protococcaceae.	Pediastrum.
	Volvoceae.	Volvox, Eudorina, Pandorina.
Phaeophyceae:	Chrysomonadina.	Dinobryon, Mallomonas.
	Peridinida.	Ceratium, Peridinium, Gymnodinium, Glenodinum.

Tiere.

Protozoa:	Rhizopoda,	Foraminifera.	Cyphoderia.
		Heliozoa.	Actinophrys.
	Infusoria,	Ciliata.	Trachelius, Codonella, Tintinnidium, Staurophrya.
Vermes:	Platyhelminthes,	Turbellaria.	Castrada.
		Rotatoria.	Rhizota, Conochilus. Illoricata, Microcodon, Asphanchna, Syn-

1) Das Süßwasserplankton. Kiel 1896.

		chaeta, Polyarthra, Triarthra, Hudsonella, Gastroschiza.
		Loricata, Mastigocerca, Diurella, Pompholix, Chromogaster, Anurea, Notholca.
		Scirtopoda, Pedalion.
Arthropoda:	Crustacea, Cladocera.	Sida, Daphnella, Daphnia, Bosmina, Chydorus, Leptodora, Bythotrephes.
	Copepoda.	Cyclops, Diaptomus, Eurytemora, Heterocope.
	Arachnoidea, Acarina.	Atax, Curvipes.
Mollusca:	Lamellibranchiata.	Dreyssena.

Vorgreifend wollen wir dieser Aufzählung noch die Wasservögel, Palmipeden des offenen Sees, einige Fische, insbesondere Corregonen, die ganz ausgezeichnete pelagische Arten sind, sowie einige überall auftretende carnivore Fische anreihen, welche die letzteren verfolgen.

Die limnopelagischen Organismen besitzen folgende allgemeine Charaktere:

Sie schweben oder schwimmen alle. Nur einige Infusorien sitzen auf Algen (Vorticellen auf Anabaena) oder sind Ectoparasiten (Epistylis auf verschiedenen Copepoden). Ihr spezifisches Gewicht ist demjenigen des Wassers beinahe gleich. Sie schweben frei im Wasser oder machen nur ganz schwache Bewegungen, um sich schwebend zu erhalten.

Meistens ist ihr spezifisches Gewicht um ein Geringes größer als dasjenige des Wassers, so daß ihre Leichen langsam zur Tiefe sinken, es sei denn, daß ein Bläschen von Verwesungsgasen ihnen genügenden Auftrieb gibt, um sie bis an die Oberfläche aufsteigen zu lassen. Die Dichte

einiger Algen ist geringer als diejenige des Wassers; weil sie in ihren Zellen Oeltröpfchen oder Gasvacuolen besitzen, schwimmen sie an der Oberfläche. Die Entomostraken, sowie einzelne Rotatoren und Protozoen besitzen ein mimetisches Schutzmittel in ihrer beinahe absoluten Durchsichtigkeit, die ihnen gestattet, im klaren Wasser den Verfolgungen ihrer Feinde zu entgehen. Die pelagischen Organismen, die in der intensiv erleuchteten Region leben, sind sehr stark pigmentiert; ihre Färbung ist sehr auffallend. Sogar die ganz durchsichtigen Tiere besitzen einzelne stark glänzende Pigmentflecken.

Es fragt sich nun, ob in den Seen wirklich eine pelagische Gesellschaft lebt, deren Vorkommen auf die oberen Schichten des offenen Sees beschränkt ist, oder ob wir diese Annahme mit Zacharias[1]) und Schröter[2]) fallen lassen müssen. Diese beiden Autoren stützen sich auf die Thatsache, daß eine gewisse Anzahl von pelagischen Organismen in der littoralen Region, ferner aber auch eine Anzahl von littoralen Organismen in der pelagischen Region gefunden worden sind. Sie schließen daraus, daß die Unterscheidung von littoralen und pelagischen Gesellschaften künstlich und unberechtigt sei, und bezeichnen die Gesamtheit der in den oberen Schichten des Sees lebenden Organismen als limnetisch, gleichviel ob sie aus der pelagischen oder der littoralen Region stammen.

Gegen diese Beweisführung möchte ich kurz folgendes einwenden: Es steht fest, daß einerseits landeinwärts wehende Winde sehr häufig Organismen aus der centralen Region des Sees mit dem Wasser gegen das Ufer treiben, und daß andererseits bei pelagischen Fängen häufig littorale Algen, die durch einen seewärts wehenden Wind in den offenen See entführt wurden, gefunden werden. Da man die Herkunft dieser erratischen, meist passiv in fremde Regionen verschleppten Organismen genau kennt, so darf man aus solchen Vorkommnissen nicht schließen, daß sie mit den ständigen Arten der betreffenden Region ein und dieselbe biologische Gesell-

---

1) Zacharias, Loc. cit. p. 27. 19.
2) Schröter, Loc. cit. p. 8.

schaft bilden. Solche erratische Formen werden nicht in der Region, in der sie zufällig gefangen werden, geboren; sie vermehren sich in derselben nicht. Man findet ja oft auf offenem See die Leichen von Käfern oder Schmetterlingen oder vom Wind oder durch Strömungen hergebrachte Blätter von Bäumen. Trotzdem fällt es niemanden ein, den Unterschied zwischen Land- und Wasserfaunen und -floren fallen zu lassen. Die sumpf- und flußbewohnenden Organismen werden bei Hochwasser in den See hinausgeführt, wo wir sie in erratischem Zustande antreffen. Der Unterschied zwischen palustren, fluviatilen und lacustren Gesellschaften bleibt dennoch bestehen. Die Organismen des Sees werden durch den Abfluß abwärts entführt. Sollten wir etwa deshalb zwischen lacustren und fluviatilen Formen nicht mehr unterscheiden? Durchaus nicht! Ich glaube daher auch in Zukunft das Recht zu haben, von pelagischen Gesellschaften zu sprechen; ich verstehe darunter die Gesamtheit der Organismen, die in der pelagischen Region des Sees leben, sich entwickeln und sich vermehren. Die littoralen Gesellschaften hingegen umfassen diejenigen Formen, die sich in der littoralen Region entwickeln und vermehren. Mischungen zwischen diesen beiden Gesellschaften kommen nur zufällig vor. Die Formen, die man in größerer oder kleinerer Anzahl weit von ihrem normalen Standorte trifft, charakterisiere ich als erratische.

Nach dem Vorgange Hensens[1]) bezeichnet man als Plankton (πλανάω = umherirren) die Gesamtheit der im Wasser der pelagischen Region schwebenden Organismen, die passiv von den Wellen und Strömungen umhergetrieben werden. Das Plankton umfaßt die Pflanzen (Algen) und Invertebraten, deren Eigenbewegungen relativ schwach sind. Es ist eigentlich nichts anderes, als die gesamte pelagische Gesellschaft mit Ausnahme der Fische und der Vögel. Es gehört alles dazu, was man in einem

---

1) Hensen, Bestimmung des Planktons oder des im Meer treibenden Materials an Pflanzen und Tieren. V. Ber. d. Komm. z. wiss. Unters. d. deutschen Meere 1887.

Netz aus feiner Seidengaze findet, das in der pelagischen Region durchs Wasser gezogen worden ist. Die Planktonfänge sind leicht auszuführen und ergeben reiche und sehr verschiedenartige Ausbeute. Das Sammeln des Planktons in den Seen wurde von verschiedenen Naturforschern eifrig betrieben. Genannt seien Apstein [1]) in Kiel, Zacharias [2]) in Plön, Birge [3]) in Wisconsin, C. Schröter [4]) in Zürich, Blanc [5]) in Lausanne u. a.

Das Sammeln des Planktons hat sehr interessante Anhaltspunkte für die Biologie der pelagischen Region ergeben. Endgültige Schlußfolgerungen sind jedoch bis jetzt noch nicht gezogen worden. In Erwartung präziser, allgemein gültiger Resultate, die das Studium des Planktons zweifellos ergeben wird, führe ich hier nur einige Ergebnisse an, die mir ziemlich gesichert erscheinen.

Von der rein systematisch-zoologischen oder botanischen Forschung abgesehen, werden Planktonstudien besonders nach zwei Richtungen betrieben:

a) Die volumetrischen Untersuchungen. Man schätzt die Quantität des Planktons, indem man die Organismen, die durch das Seidengazenetz gefangen wurden, in einem gradierten Meßglas sich am Boden absetzen läßt und das so gemessene Volumen organischer Substanz mit dem Volumen des durch das Netz filtrierten Wassers vergleicht. Versuche, durch Wägung die Planktonmenge zu bestimmen, sind bis jetzt gescheitert [6]).

b) Statistische Untersuchungen. Man zählt die Anzahl der Individuen jeder Art der im Plankton vertretenen Organismen. Das wurde mehrfach mit einer bewunderungswürdigen Geduld und Ausdauer ausgeführt.

Die Fänge lassen sich in zweierlei Weise ausführen: Vertikale Fänge durchdringen von einer gewissen Tiefe

---

1) Apstein, Das Süßwasserplankton. Kiel 1896.

2) O. Zacharias, Forschungsbericht aus der biologischen Station zu Plön. Berlin 1893. ff.

3) E. A. Birge, Plankton Studies on lake. Transact. of Wisconsin Academy of nat. Sc. X. 421; XI. 274. 1896/97.

4) C. Schröter, Die Schwebeflora unserer Seen. Zürich 1896.

5) Blanc, Le Plancton nocturne du lac Léman. Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat. XXXIV. 225. 1898.

6) Vergl. hingegen Zacharias, Forschungsbericht III. 97. 59.

aus sämtliche übereinandergelagerte Schichten der Region. Die horizontalen Fänge betreffen nur eine Schicht von bestimmter Tiefe.

Folgende allgemeine Thatsachen scheinen aus den bisherigen Beobachtungen hervorzugehen:

A) Das Plankton lebt in den oberen Schichten des Sees bis zu 40—50 m Tiefe, ausnahmsweise bis zu 100 oder 200 m. Die tieferen Schichten enthalten nur die Leichen der pelagischen Organismen, die langsam auf den Boden des Sees sinken.

B) Die Verteilung der verschiedenen Arten der pelagischen Organismen in den übereinandergelagerten Wasserschichten wechselt von Stunde zu Stunde, von Tag zu Tag, von Jahreszeit zu Jahreszeit. Im allgemeinen sind die obersten Schichten am stärksten bevölkert.

C) Einzelne Arten treten nur in gewissen Jahreszeiten, andere das ganze Jahr hindurch auf.

D) Je nach ihrer Dichte bilden die Algen zwei Gruppen. Diejenigen, die leichter sind als das Wasser, schwimmen auf demselben und bilden die Schwimmflora; diejenigen, die ebenso schwer sind wie das Wasser, setzen die Schwebeflora zusammen (C. Schröter). Die Schwimmflora bildet zum Teil das sogenannte „Seeblühen“ [1]).

E) Die pelagischen Entomostraken (vielleicht auch die Rotatoren) unterliegen täglichen periodischen Migrationen, durch die sie nachts an die Oberfläche, am Tage hingegen in die tieferen Schichten, wahrscheinlich an die untere Grenze der erleuchteten Schicht geführt werden (Weismann, Forel).

F) Im gleichen See schwankt die Quantität des Planktons mit den Jahreszeiten. Sie ist in der warmen Jahreszeit größer als in der kalten (Zacharias, Apstein, Birge, Forel). Im Frühling scheint in manchen Fällen ein Hauptmaximum, im Herbst ein sekundäres Maximum aufzutreten.

---

[1]) Oft besteht auch das sogenannte „Seeblühen“ aus Massenansammlungen von Pollen, insbesondere von Coniferenpollen, die durch den Wind und die Zuflüsse in den See gebracht wurden.

Als Beispiel mögen folgende von Zacharias[1]) im Plöner See 1894/95 gefundene Werte angeführt werden. Sie drücken in Kubikcentimetern die Quantität des Planktons aus, das in einem Prisma von 1 m² Grundfläche und 40 m Höhe enthalten war.

	cm³		cm³
Oktober . . .	118	April	43
November . .	100	Mai	173
Dezember . . .	28	Juni	128
Januar . . .	21	Juli	306
Februar . . .	17	August . . .	509
März	18	September . .	140

G) Die Quantität des Planktons kann in zwei benachbarten Seen außerordentlich verschieden sein. So hat Apstein[2]) gefunden:

	Minimum	Maximum
	Kubikcentimeter auf 1 m²	
Plöner See . . .	13	424
Dobersdorfer See .	136	3977

Fänge, die ich in der gleichen Woche des Monats Mai 1896 ausführte, ergaben:

im Bodensee	13	cm³	auf 1	m²
„ Züricher See . . .	260	„	„ 1	„
„ Genfer See . . .	126	„	„ 1	„
„ Neuenburger See .	45	„	„ 1	„

Es scheint, daß unter sonst gleichen Verhältnissen die relative Planktonmenge in kleinen Seen bedeutender ist als in großen (Schrodtmann)[3]).

H) Die Zusammensetzung des Planktons erleidet auffallende von See zu See verschiedene periodische Schwankungen. Einige beständig anwesende Arten (einige Copepoden, Bosmina, Anurea, einige Diatomeen) ausgenommen, treten die meisten Typen nur periodisch auf. Sie erscheinen alsdann in der pelagischen Region entweder nur als Larven (Dreyssena) und Zoosporen (Pandorina morum) oder als Dauer- und Wintereier, als Sporen etc. Daraus

---

1) Zacharias, Forschungsberichte IV. S. 80. 1896.
2) Apstein, Loc. cit. p. 89.
3) In Zacharias IV. S. 235.

ergibt sich, daß im Plankton je nach der Jahreszeit ein Typus, sei er tierisch oder pflanzlich, vorherrscht, oder daß Formen auftreten, die in anderen Jahreszeiten im Plankton nicht vorhanden sind. Folgendes Beispiel sei den sehr vollständigen Tabellen Apsteins entnommen. Aus den Fängen, die in vier aufeinanderfolgenden Monaten im Dobersdorfer See gemacht wurden, wählen wir einige Arten aus. Die angeführten Ziffern drücken die Anzahl der Individuen aus, die einem Quadratdecimeter der Oberfläche entsprechen.

	April	Juli	Oktober	Februar
Clathrocystis aeruginosa	102480	414560	1167200	5000
Melosira varians [1] . .	2147640	8181000	71886750	70000
Fragilaria virescens . .	10532630	1383190	666600	2000000
Ceratium hirundinella .	1300	26410	1260	—
Anurea cochlearis . .	8600	5200	2180	—
Daphnia galeata . . .	40	—	930	100
Leptodora hyalina . .	—	40	—	—
Diaptomus graciloides .	750	2190	980	40
Cyclops oïthonoides . .	5190	1740	2040	110

Diese Zahlen gestatten auf die ungeheure Produktion von Organismen zu schließen, die zeitweise stattfindet. In gewissen Jahreszeiten besteht das Plankton vorwiegend aus Algen, Schizophyceen, Diatomeen oder Chlorophyceen etc.; in anderen herrschen Protozoen, Rotatoren oder Entomostraken vor.

Als Beispiel mögen noch folgende von Zacharias [2]) 1892 im Plöner See für das Phytoplankton erhaltene Werte angeführt werden:

	Zeit des Auftretens	Maximum
Anabaena und Clathrocystis .	Januar-Juli	Juli
Asterionella formosa	Januar-Oktober	April-Juli
Melosira	März-Mai	März-April
Fragilaria crotonensis	April-September	Juni
Gloiotricha echinulata . . .	Mai-September	August-Septbr.
Atheia und Rhizosolenia . . .	Juni-August	Juli

---

[1]) Die Melosirafäden, die hier gezählt wurden, sind Kolonieen, deren jede von 10—100 Individuen gebildet wird. Die oben angeführten Zahlen müssen also mindestens mit 50 multipliziert werden, um Werte zu erhalten, die eine Vorstellung von der Menge der damals im Dobersdorfer See lebenden Melosireen geben.

[2]) Zacharias I. 47; II. 95; III. 129.

J) Die chemische Zusammensetzung des Planktons ist von seiner biologischen Zusammensetzung abhängig. Nachstehend nach Hensen[1]) die relativen Werte zweier (mariner) Planktone, von denen das eine aus Diatomeen (Rhizosolenia), das andere aus Copepoden bestand.

Ein Kubikcentimeter Plankton wiegt:

	naß	trocken	Gehalt an org. Substanz
Diatomeen	720 mg	6,3 mg	2,7 mg
Copepoden	144 „	13,2 „	13,1 „

Das Plankton enthält nur relativ geringe Mengen organischer Substanz. Aus 22 Fängen, die Apstein[2]) in den Seen von Plön und Dobersdorf ausführte und die eine Gesamtmenge von mehr als 15000 cm³ ausmachten, fand er, daß ein Kubikcentimeter feuchten Planktons

bei 20° getrocknet 10 mg wiegt
„ 100° „ 8 „ „

Daraus ergibt sich, daß das Plankton zu mehr als 99 % aus Wasser besteht. Die Trockensubstanz enthält im Mittel 22 % Asche und 78 % organische Bestandteile. Ein Kubikcentimeter feuchten Planktons enthält demnach nur 6 mg organischer Substanz und erst 165 cm³ Plankton stellen ungefähr 1 g organischer Substanz dar.

Die chemische Zusammensetzung des Planktons ergibt sich aus einer Analyse von Brandt[3]) (Plankton aus der Kielerbucht).

Albuminoide	21,2
Kohlehydrate	66,5
Fett	4,7
Asche	7,6

K) Was die Extreme der Menge des Plankton auf einen Quadratmeter der Seeoberfläche bezogen anbetrifft, so möchte ich folgende Werte anführen:

Minimum: 10 cm³ feuchten Planktons per Quadratmeter Oberfl.
Maximum: 4000 cm³ „ „ „ „ „

[1]) Hensen, Ueber die Bestimmung des Planktons S. 34. Kiel 1887.
[2]) Apstein, Loc. cit. p. 99.
[3]) Apstein, a. a. O. S. 99.

Nach den oben gegebenen Zahlen über die chemische Zusammensetzung des Planktons besagen diese Werte, daß die Menge organischer Substanz auf dem Quadratmeter der Oberfläche zwischen 0,06 und 24 g schwankt. Vergleichen wir diese Quantitäten mit der Menge der im Wasser gelösten organischen Substanzen, die im Mittel 10—20 mg im Liter, oder 10—20 g im Kubikmeter oder 500—1000 g in einem Wassercylinder von 1 m² Grundfläche und 50 m Höhe beträgt (die gewöhnliche Höhe der Schicht für Planktonfänge), so ergibt sich per Quadratmeter Oberfläche des Sees

gelöste organische Substanz	500—1000 g
organische Substanz in Form von Plankton	0,06—24 g

Allerdings ist in der letzten Zahl die organische Substanz der Körper der Fische nicht mit inbegriffen. Vorderhand fehlt uns jeder Anhaltspunkt, um diese Menge zu ermitteln.

Daß die meisten Tiere gesellig sind, ist bekannt. Sie vereinigen sich zu Gruppen, zu Flügen, zu Schwärmen etc.; nur wenige leben als Einsiedler oder paarweise. Von den festsitzenden Tieren, deren Vermehrung an Ort und Stelle selbst geschieht, abgesehen, haben die meisten frei beweglichen Tiere Neigung gesellig aufzutreten. Es fragt sich, ob das gleiche auch für die pelagischen Organismen gilt. Die Antwort auf diese Frage ist für das praktische Studium des Planktons von großer Tragweite. Je nachdem sie ausfällt, müssen die Methoden für die Schätzung der absoluten und relativen Menge der im Wasser suspendierten organischen Substanz abgeändert werden. Wenn die Organismen gleichmäßig in der ganzen Wassermasse des Sees verteilt sind, so gibt ein einziger Fang genügende Anhaltspunkte über die Menge des Planktons. Sind hingegen die pelagischen Organismen zu Schwärmen oder Gruppen vereint, so kann ein angenäherter Mittelwert nur durch eine große Anzahl von Fängen erhalten werden.

Nach den Beobachtungen zu urteilen, scheinen mir die Verhältnisse wie folgt zu liegen:

Die Pflanzen, d. h. die pelagischen Algen, denen die aktive Eigenbewegung abgeht, finden sich passiv überall zerstreut und treten jedenfalls nicht in scharf umgrenzten oder lokalisierten Gruppen auf. Bei den mit vibrierenden Cilien versehenen Algen und Zoosporen, sowie bei den niederen Tieren, wie Protozoen und Rotatoren, deren Eigenbewegung relativ schwach ist, herrscht der passive Transport entschieden vor. Es ist daher beinahe selbstverständlich, daß sie in der ganzen pelagischen Region gleichmäßig zerstreut sind [1]). Einzig für die Entomostraken, deren Schwimmbewegungen genügend aktiv sind, scheint eine Gruppierung in Schwärme möglich. Dieselbe ist zur Stunde aber noch nicht endgültig nachgewiesen. Es ist ja klar, daß sie bei ihren täglichen Wanderungen, wenn sie in die gleichen Tiefenschichten auf- oder absteigen, gemeinsame Bewegungen ausführen. Zu gewissen Tagesstunden tritt daher ein bestimmter Typus von Entomostraken besonders in einer gewissen Tiefe auf. Die Erfahrungsthatsachen scheinen jedoch auszuschließen, daß sie sich in der gleichen horizontalen Schicht zu umgrenzten individuenreichen Gruppen vereinigen, und daß außerhalb dieser Vereinigungen keine oder nur vereinzelte Exemplare auftreten. Zahlreiche unter den gleichen Bedingungen an verschiedenen, jedoch benachbarten Stellen ausgeführte Fänge lassen keine Schwankung der Planktonmenge erkennen, die genügend wäre, um eine Verteilung der Entomostraken in geschlossenen Vereinigungen wahrscheinlich zu machen.

Ich betone jedoch ausdrücklich, daß ich, wenn ich auch von der beinahe gleichförmigen Verteilung der Mikroorganismen an der gleichen Beobachtungsstelle überzeugt bin, doch diese Ansicht nicht auf den ganzen See ausgedehnt wissen will. Die Zusammensetzung des Plank-

[1]) Ich sehe hier von den an der Oberfläche des Wassers schwimmenden Algen ab. Diese werden durch Winde und Strömungen zusammengetrieben und häufen sich oft sehr beträchtlich an. Ich konstatiere allerdings, daß Pandorina morum, deren vibrierende Bewegungen relativ langsam sind, sich hie und da am Littoral in so beträchtlichen Massen anhäuft, daß das Wasser eine grünliche Färbung erhält. Könnte ähnliches nicht auch bei pelagischen Organismen mit schwachen spontanen oder nicht spontanen Bewegungen stattfinden?

tons kann in einem großen See von einem Ende zum anderen sehr bedeutend schwanken. Es ist dies durch zahlreiche Beobachtungen verschiedener Naturforscher festgestellt.

Die pelagischen Organismen finden sich ausschließlich in den oberen Schichten des Sees bis zu 40, 60, vielleicht 100 oder 200 m Tiefe, je nach der Jahreszeit und je nach den Eigentümlichkeiten des Sees. Die tiefer liegenden Schichten sind unbewohnt; hier trifft man nur Leichen pelagischer Organismen, die infolge ihrer Schwere auf den Grund des Sees sinken.

Die pelagischen Tiere, wenigstens die am meisten beweglichen unter ihnen, die Entomostraken, vollführen täglich periodische Wanderungen. Während der Nacht schwimmen sie, wenn der See ruhig ist, in der Nähe der Oberfläche; tagsüber steigen sie in die tieferen Schichten hinab, wahrscheinlich bis an die untere Grenze des erleuchteten Wassers (Weismann, Forel, Blanc)[1].

Diese in großen Seen leicht nachzuweisenden Schwankungen scheinen in kleineren zu fehlen (Zacharias). Die pelagischen Algen scheinen überhaupt solche Wanderungen nicht auszuführen.

Die pelagische Bevölkerung des gleichen Sees wechselt mit der Jahreszeit. Jede Art hat ihre eigene Periodizität, infolge deren sie in gewissen Jahreszeiten in Form von Keimen oder Eiern, in anderen ausgewachsen als Pflanze oder Tier erscheint. Die Zeit des massenhaften Auftretens jeder Form wechselt auch je nach der Art. Es ergibt sich daraus eine auffallende Schwankung in der Gruppierung der pelagischen Bevölkerung während der verschiedenen Jahreszeiten.

Neben dieser mehr oder weniger regelmäßigen, wahrscheinlich auf Temperaturschwankungen beruhenden Periodizität beobachtet man hie und da aperiodisch eine ganz außerordentlich starke Vermehrung einer bestimmten Art.

---

[1] Weismann, Das Tierleben im Bodensee. Lindau 1877. F. A. Forel, Faune profonde du lac Léman. Actes de la Soc. helv. Sc. nat. Chur 1874. H. Blanc, Le Plancton nocturne du Léman. Bull. Soc. Vaud. Sc. nat. XXXIV. 225. Lausanne 1898.

Als Grund hierfür muß wohl angenommen werden, daß diese Art zu der betreffenden Zeit besonders günstige Entwickelungsbedingungen vorgefunden und sich zu Nutzen gemacht hat. Dieser Ueberschuß an günstigen Lebensbedingungen nimmt allmählich ab und damit auch die Individuenzahl jener Art, bis die verschiedenen Typen der pelagischen Bevölkerung des Sees wieder in normalem Verhältnis vertreten sind. So fand z. B. während des Frühlings 1896 im Züricher See, dessen pelagische Bevölkerung bis dahin nichts Abnormes gezeigt hatte, eine ungeheure Vermehrung einer Diatomee, der Tabellaria fenestrata statt. Sie trat in so kolossalen Mengen auf, daß sämtliche andere Planktonformen ihr gegenüber beinahe verschwanden. Im Mai 1896 habe ich hier das Volumen des beinahe ausschließlich aus Tabellaria bestehenden Planktons gemessen und dabei 260 cm^3 auf dem Quadratmeter Seeoberfläche gefunden. Schröter beobachtete sogar 1000 cm^3. Dieser Zustand dauerte über ein Jahr. Während des Sommers 1897 stellten sich allmählich wieder normale Verhältnisse ein. Während der gleichen Periode war in den benachbarten Seen, ja sogar im oberen Züricher See, keine abnorm große Menge von Tabellaria zu bemerken.

Die pelagische Bevölkerung zweier benachbarter, anscheinend ganz gleichen klimatischen Bedingungen unterworfener Seen kann bedeutende Unterschiede aufweisen. Die Gruppierung der Typen ist eine andere, andere Arten herrschen vor und die Zusammensetzung des Planktons ist ganz abweichend.

Bleiben solche Unterschiede auf die Dauer bestehen? Ist die pelagische Bevölkerung jedes Sees beständig? Es ist dies kaum wahrscheinlich; ich glaube vielmehr, daß eine zufällig eintretende überwiegende Vermehrung irgend einer Art, analog der Vermehrung der Tabellaria im Züricher See, oder einer Gruppe von Organismen zeitweise den Charakter der Bevölkerung des Sees verändern kann. So sind z. B. Seen mit vorwiegendem Entomostraken - Plankton beschrieben worden, ferner solche mit Rotatoren-, mit Dinoflagellaten- oder Algen-

Plankton. Bald ist es die eine, bald die andere Alge, die einen See charakterisiert. Allein bis heute ist es durchaus nicht erwiesen, daß diese Typen unbegrenzt lange fortdauern.

Noch zwei an den extremen Enden des natürlichen Systems stehende Gruppen von Organismen sind zu besprechen: die Vertebraten und die Bakteriaceen, die ich in der allgemeinen Beschreibung der Regionen des Sees aus verschiedenen Gründen nicht behandelt habe.

6. Vertebraten.

Säugetiere. Der Mensch hat einen sehr bedeutenden Einfluß auf die Oekonomie des Sees, indem er einerseits die Abwasser der Städte und Fabriken in denselben einleitet, andererseits daraus Fische wegfängt.

Einige Fledermäuse fliegen über dem Wasser, fangen Insekten und lassen ihre Exkremente in den See fallen.

Einige Raub- und Nagetiere, die Fischotter, der Biber, die Wasserratte, verirren sich hie und da aus den Flüssen, ihren normalen Wohnplätzen, in die littorale Zone des Sees. Ich betrachte diese Arten als erratisch. Je größer der See ist, desto geringer ist die Beteiligung dieser Vertebraten an dem animalen Leben des Sees. Die Seehunde des Baikalsees sind die einzigen Flossenfüßer, die heute als ständige Seebewohner bekannt sind.

Vögel. Die Zahl der auf dem See ständig wohnenden Vögel ist gering. Dahin gehören einige Strandvögel, Alcedo, Cinclus etc. Milvus ater (schwarzer Milan), Schwalben etc., die über dem Wasser fliegen, um Fische oder Insekten zu fangen, lassen ihre Exkremente ins Wasser fallen. Sämtliche Lauf- und Schwimmvögel sind Zugvögel. Sie verweilen bei ihren regelmäßig oder zufällig wiederkehrenden Wanderungen an den Ufern des Sees oder in seiner littoralen und pelagischen Region. Sie beeinflussen die Oekonomie des Sees insoweit, als sie Tiere und Pflanzen wegfangen. Aeußerst wichtig ist ihre

Rolle in biologischer Hinsicht. Sie sind die thätigsten Agenten der Weiterverbreitung der aquatischen Organismen. Bei ihren Wanderungen transportieren sie Keime, Eier, Samen etc. in ihrem Darminhalt, auf ihrem Gefieder, an ihren Füßen und Schnäbeln, von einem See zum anderen. Ueber ihre Verteilung in der lacustren Fauna läßt sich kurz sagen, daß alle Laufvögel und Sumpfvögel am Strande leben, während die Entenvögel und Taucher, sowie die Langflügler sich im ganzen Gebiet des Sees finden.

Reptilien. Einige Schildkröten und Schlangen leben in der littoralen Zone kleiner Seen. Je größer der See, desto weniger normal erscheint ihr Vorkommen in demselben. Sie stellen einen palustren und fluviatilen, in Seen nur erratisch auftretenden Typus dar.

Auch für die Amphibien (Froschlurche und Schwanzlurche) gilt das. Sie kommen nur zufällig in der littoralen Region großer Seen vor. In Gewässern, die oft durch starken Wellenschlag bewegt werden, kann ihr Vorkommen geradezu als erratisch bezeichnet werden.

Fische. Beinahe sämtliche Süßwasserfische gehören normal oder zufällig der lacustren Fauna an. Einige flußbewohnende Arten (Aesche [Thymallus], Ellritze) kommen nur ausnahmsweise und erratisch vor. Einige wandernde Arten (Lachs, Aal, Forelle) halten sich nur zeitweise in Seen auf. Eine große Anzahl endlich bewohnt sie ständig.

Das Vorkommen mancher Arten ist auf die littorale Region beschränkt (Laube [Alburnus lucidus], Barsch, Hecht, Groppe [Cottus gobio]). Andere sind rein pelagisch und kommen nie oder nur ausnahmsweise in die littoralen Gewässer (Corregonen, Saibling etc.). Wieder andere Arten endlich zeigen sich überall und schweifen willkürlich oder ihren Bedürfnissen folgend, in sämtlichen Regionen des Sees umher.

Weitere Arten steigen in die Tiefenregion hinab, einzelne Corregonen um zu laichen, die Quappen (Lota vulgaris) um die Eier und die Brut der Felchen aufzusuchen.

Die Leichtigkeit, mit der die Fische große Distanzen zurücklegen können, bewirkt, daß sie nur selten auf eine bestimmte Region des Sees beschränkt sind. Beinahe alle führen periodische, mit den Jahreszeiten wiederkehrende Wanderungen aus. Wir haben das Absteigen der Corregonen und Quappen (Lota) in die großen Tiefen des Sees bereits erwähnt. Die Cyprinoïden leben im Sommer in den relativ wenig durchsichtigen littoralen Gewässern, die ihnen in ihrer üppigen Vegetation grüner Pflanzen sichere Schlupfwinkel vor Feinden bieten. Im Winter, wenn die Gewässer sich klären, ziehen sie sich in die mittleren Schichten des Sees zurück. Die von ihnen lebenden Raubfische folgen ihnen auf ihren Wanderungen nach. Der Hecht laicht in der Uferbank, die Forelle in den Flüssen etc.

7. Bakterien.

Wir haben die den See bewohnenden Organismen bis hinab zu den Protozoen und den Algen aufgezählt und ihre Verteilung in den drei biologischen Regionen des Sees, soweit sie bekannt ist, skizziert.

Noch aber haben wir die niedrigsten Lebewesen, die Bakterien oder Bakteriaceen, allgemein Mikroben genannt, zu behandeln [1]). Die Bakterien, Vibrionen, Mikrokokken etc. bewohnen die Seen in großer Anzahl und spielen in ihnen eine wichtige Rolle. Wegen ihrer außerordentlichen Kleinheit sind sie auch mit dem besten Mikroskop nur schwer wahrzunehmen; wegen der Umständlichkeit und Schwierigkeit der zu ihrer Aufsuchung dienenden Methoden sind ihre Arten daher nicht immer mit Sicherheit zu erkennen und ihre Wohnsitze nicht genügend genau festgestellt. Zahlreiche Untersuchungen über die Qualität des Trinkwassers haben die Aufmerksamkeit auf diese kleinsten Lebewesen gelenkt und zu interessanten Arbeiten über die Bakterien Anlaß ge-

[1]) Ich vermeide es absichtlich, auf die systematische Stellung der Bakteriaceen einzugehen. Für unsere Zwecke ist es gleichgültig, ob sie zu den Algen oder zu den Pilzen gestellt werden.

geben; erst dadurch hat man ihre Bedeutung einigermaßen kennen gelernt. Neben ihren biologischen Eigentümlichkeiten aber kennen wir nur einzelne isolierte Thatsachen. In folgendem will ich versuchen, durch eine zum Teil etwas hypothetische Verallgemeinerung eine Darstellung der Rolle zu geben, die sie im Haushalt eines Sees spielen.

Durch Anwendung der modernen bakteriologischen Methoden, insbesondere der Züchtung in Reinkulturen, hat man die Gegenwart der Mikroben im Wasser der Seen nachgewiesen (Genfer-, Boden-, Züricher-See etc.).

Man hat sie in den Oberflächengewässern, wie in den tiefen Schichten, im offenen See, wie in der Uferregion, im freien Wasser, wie im Schlamm des Grundes gefunden.

Sie kommen überall in der Wassermasse des Sees vor. Ihre Zahl schwankt von einigen wenigen bis zu mehreren Tausenden im Kubikcentimeter, von einigen Tausenden bis zu mehreren Millionen im Liter. Meines Wissens hat bis jetzt keine einzige sorgfältige Analyse die Existenz eines bakterienfreien Wassers erwiesen. Nach dem heutigen Stand unserer Kenntnisse kann folgendes angenommen werden:

a) In der Oberflächenschicht des Schlammes, der den Boden des Sees sowohl in der tiefen, als auch in der littoralen Region bedeckt, ist die Anzahl der Mikroben ungeheuer groß (Tausende im Kubikcentimeter); das ist bis in eine Tiefe von 40 m nachgewiesen (Lortet, Seiler). Es sprechen keine Gründe dagegen, entsprechende Verhältnisse auch für die größten Tiefen der Seen anzunehmen.

b) Im Wasser der Zuflüsse, insbesondere dem der Abwässer von Städten, ist die Zahl der Mikroben ebenfalls ungeheuer (Tausende im Kubikcentimeter). Dieses Wasser mischt sich mit dem Seewasser. An der Mündung solcher Kanäle wimmelt es noch von Bakterien; mit zunehmender Verdünnung nimmt ihre Zahl ab.

c) Das offene Seewasser weist eine geringe Zahl von Mikroben auf (Dutzende im Kubikcentimeter).

d) Im Oberflächenwasser ist die Zahl der Bakterien geringer, als in den darunter liegenden Schichten.

Dieses Gesetz ist bis zu 40 m Tiefe kontrolliert worden. Die relative Seltenheit der Mikroben im Oberflächenwasser wird der reinigenden, d. h. der bakterienabtötenden Einwirkung des Lichtes zugeschrieben. Wir werden in folgendem eine andere Erklärung dieses Faktums vorschlagen.

Bei ruhigem Wetter ist die Zahl der Mikroben im offenen Wasser der pelagischen Region am kleinsten.

e) Im gleichen offenen Wasser der pelagischen Region kann die Anzahl der Keime in den Oelflecken an der Oberfläche sehr groß sein.

f) Wenn der Schlamm der littoralen Zone durch Sturmwellen aufgewühlt worden ist, so wird er leicht durch die Strömungen in den offenen See hinausgeführt. Das Seewasser kann alsdann durch eine große Anzahl von Keimen verunreinigt sein (Hunderte im Kubikcentimeter).

g) Die Mehrzahl der Wasserbakterien sind Saprophyten. Dagegen sind im Schlamm des Seebodens und in dem durch aufgewühlten Schlamm oder durch Ablaufkanäle verunreinigten Wasser pathogene Mikroben gefunden worden.

Bei der für die öffentliche Hygiene so großen Wichtigkeit der Trinkwasserfrage möchte ich nicht unterlassen, einige allgemeine Thatsachen über die Rolle der Mikroben in der Oekonomie des Sees anzuführen.

Vorausgeschickt sei, daß die Bakterien chlorophyllfreie Pflanzen sind, d. h. daß sie, um zu leben, des Lichtes nicht bedürfen.

Entweder leben sie frei im Wasser, dessen Gehalt an Nährstoffen demjenigen gewisser Nährlösungen beinahe gleichkommt, in Abwässern etc. oder als Parasiten. In letzterem Falle sind sie entweder Ectoparasiten, d. h. auf dem Aeußeren eines lebenden Organismus angesiedelt, oder Endoparasiten, die im Innern des lebenden Organismus vegetieren, oder endlich, sie leben sapro-

phytisch auf irgend einem leblosen organischen Substrat [1]).

Durch ihre Lebensthätigkeit zersetzen sie die gelösten organischen Substanzen und die Gewebe in einfachere Bestandteile. Es werden Kohlensäure, Methan und häufig auch Ptomaine entwickelt. Die Bakteriaceen sind also Gärungs- und Fäulniserreger. Sie zerstören die organischen Substanzen und die Organismen.

Die freien Bakteriaceen, ob sie frei umherschwimmen oder an einem Körper anhaften, entnehmen ihre Nahrung den im Medium gelösten Nährstoffen, die dadurch in einfachere Verbindungen übergeführt werden. Die Cladothrix-, Crenothrix- etc. Arten der Abwasser führenden Kanäle bedingen das Faulen dieser Gewässer. In den Seen kommen sie nur an den Mündungen solcher Kanäle vor und gehen nur wenige Meter weit hinaus, d. h. nur so weit, als der Gehalt an organischen Stoffen noch groß genug ist, um das Wasser als eine wahre Nährbouillon erscheinen zu lassen. Diese freien Bakteriaceen sind sämtlich saprogen.

Die ectoparasitischen Mikroben und Pilze lassen sich auf Kadavern nieder. Durch ihre Lebensthätigkeit rufen sie in deren Geweben Fäulnisgärung hervor und zerlegen sie in einfachere Elemente. Sie sind Fäulniserreger, die die Kadaver zerstören, indem sie ihre organische Substanz umwandeln; sie wirken also auch saprogen. Man findet sie besonders

a) auf den Leichen der leichten pelagischen Organismen an der Oberfläche. Da ein Oelfleck diese Ueberreste zusammenhällt, wimmelt das Wasser hier von Mikroorganismen;

b) auf den in die Tiefe sinkenden Leichen der schweren pelagischen Organismen. Die Menge der Leichen vergrößert sich mit zunehmender Tiefe, da die einer jeden

[1]) Ich gehe hier nicht sowohl vom systematischen, als vielmehr vom biologischen Standpunkt aus und teile die Mikroben wie folgt ein:
die saprogenen Mikroben erregen Fäulnisgärung;
die peptogenen wirken begünstigend auf die Verdauungsfunktionen ihres Wirtes ein;
die pathogenen rufen in den Geweben ihres Wirtes funktionelle Störungen, d. h. Krankheiten hervor.

durchdrungenen Schicht entstammenden Leichen sich anschließen. Durch fortwährende Vermehrung nimmt die Zahl der Fäulnisbakterien mit dem Alter der Leiche zu; deshalb ist ihre Menge in der Tiefe des Sees am größten. Gerade diese Anhäufung der mit Fäulnisbakterien beladenen pelagischen Leichen in der Tiefe möchte ich neben der bakterientötenden Einwirkung des Sonnenlichtes zur Erklärung der Thatsachen heranziehen, daß die mittleren dunklen Schichten des Sees mehr Mikroben enthalten, als die oberen erleuchteten;

c) auf organischen Ueberresten aller Art, die den Schlamm des Grundes durchsetzen.

Dank den zu Boden gesunkenen Leichen der pelagischen Organismen und dem Niederschlag der anderen im Wasser suspendierten organischen Reste, stellt sich der Schlamm geradezu als eine von in Fäulnis begriffener organischer Substanz durchsetzte Masse dar, auf der die saprophytischen Mikroben kräftig vegetieren. Sie bringen diesen Schlamm zum Gären, zersetzen ihn in Substanzen, die im Wasser löslich sind, und einen anorganischen unlöslichen Rest, der die animalischen Seealluvionen (lehmigen Mergel) bildet.

Die parasitischen Bakteriaceen leben auf oder in den Körpern ihrer Wirte, die sowohl wasser- als auch landbewohnende Tiere sein können. Die Bakterien beider Art Wirte gelangen in den See. Es geschieht dies mit den Fäces der Tiere oder durch ihre Leichen, die sich entweder direkt im See vorfinden (Wassertiere) oder durch die Zuflüsse und Abwässer herbeigeführt werden (Landtiere). Die Leichen der Wirte werden bald zerstört und die Parasiten in Freiheit gesetzt. Sie vermehren sich aber nicht weiter, weil das Seewasser kein günstiger Nährboden für sie ist. Sie vegetieren nur schwach fort, weil ihnen die nötigen Nährstoffe in zu verdünnter oder ungeeigneter Form zur Verfügung stehen, und werden bald eine Beute der im See einheimischen Mikroorganismen. Diejenigen, die nicht gefressen werden, sterben bald ab. Es ist dies sowohl mit den peptogenen Parasiten, die an den Verdauungsfunktionen der

Organismen teilnehmen, als auch mit den pathogenen, im lebenden Organismus Krankheit erzeugenden Parasiten der Fall. Insbesondere trifft es auch für die pathogenen Mikroben des Menschen und der Haustiere zu, die uns in hygienischer Hinsicht am meisten interessieren. Diese endoparasitischen pathogenen Mikroben brauchen, um zu leben und sich zu vermehren, die hohen Körpertemperatur der Säugetiere, d. h. 35 bis 40° C. Eine solche, zu ihrer Vermehrung nötige Wärme finden sie im Seewasser nirgends. Wir müssen daher diese endoparasitischen pathogenen Bakteriaceen als erratische Bewohner des Seewassers bezeichnen.

Es ist zwar Thatsache, daß der See das Sammelbecken aller Abwässer einer Gegend ist, und daß infolge davon seine Gewässer die Exkremente von Menschen und Tieren empfangen, die in Zeiten von Epidemieen pathogene Bakteriaceen enthalten; insofern ist es theoretisch unleugbar richtig, daß das Seewasser die Keime zu pathologischen Infektionen enthalten kann. Allein in Wirklichkeit, d. h. in der Praxis ist doch die Ansteckungsgefahr aus den eben angeführten Gründen gleich Null anzuschlagen. Die historische Entwickelung der Hygiene derjenigen Städte, deren Versorgung mit Seewasser auf rationeller Basis hergestellt wurde, beweist das zur Genüge.

8. Der Ursprung der lacustren Gesellschaften.

Jeder See ist nur eine ephemere Erscheinung in der Geschichte der Erdrinde. Er ist in einem gewissen Momente in der Vergangenheit entstanden. Daher muß seine Einwohnerschaft, wenn sie nicht etwa in globo und in situ an Ort und Stelle geschaffen wurde, eine Annahme, für die gar keine Gründe vorliegen, in demselben eingeführt worden sein. Es fragt sich, woher die verschiedenen biologischen Gesellschaften, die den See bewohnen, stammen..

Littorale Gesellschaften. Die Pflanzen und Tiere, die das Littoral bewohnen, sind in ihrer großen

Mehrzahl dahin gelangt, indem sie dem Lauf der sich in den See ergießenden Zuflüsse folgten. Der Fluß brachte die ihn bewohnenden Organismen, ferner die Organismen der Sümpfe, aus denen er Wasser empfängt, und die Organismen benachbarter Seen, die er durchfließt, teils als erwachsene Individuen, teils in Gestalt von Eiern, Samen und Keimen in seinen Unterlauf und in sein Aestuar, wo er sie, wie alle Schwemmprodukte, absetzte. Von da aus verbreiten sie sich allmählich in den littoralen Gewässern und passen sich dem neuen Medium an. Arten, denen die Anpassungsfähigkeit abgeht, fehlen der lacustren Gesellschaft oder kommen doch nur erratisch vor, ohne hier Nachkommenschaft zu erzeugen und sich zu vermehren. Die Arten dagegen, die sich den neuen Lebensbedingungen anbequemen können, setzen sich im See fest, bleiben ganz unverändert oder erleiden, den Gesetzen der natürlichen Zuchtwahl entsprechend, organische Modifikationen.

Die Lebensbedingungen in den littoralen Gewässern sind von denjenigen in anderen süßen Binnengewässern wenig verschieden. Die Ansiedelung der Organismen in den ersteren vollzieht sich daher zweifelsohne sehr leicht.

Außer dieser Form des Einwanderns in den See, die wir die normale nennen wollen, können aquatische Organismen auch zufällig eingeführt werden. Insekten können den See durch aktive Wanderung erreichen, indem sie in ausgewachsenem Zustande von einem See zum anderen fliegen, gleich wie es die Wandervögel thun. Die Wandervögel vermitteln zugleich einen passiven Transport von lacustren Organismen. Bei ihren jährlichen Wanderungen lassen sie sich der Reihe nach auf verschiedenen Seen nieder. An ihrem Gefieder, auf ihrem Schnabel oder an ihren Füßen bleiben erwachsene Organismen oder Eier, Samen, Cysten, Keime etc. hängen, oder sie transportieren in ihrem Darm Samen, die dem Einfluß der Verdauungssäfte widerstehen, und verschleppen neue Arten in Seen, denen dieselben fehlten. Der Mensch selbst ist in dieser Beziehung, bewußt oder unbewußt, ein wichtiger Faktor. Die Fischzüchter haben in mehr als

einem See in der Absicht, den Ertrag an Fischen zu mehren, exotische Fischarten eingeführt. Durch die Naturforscher ist die ursprünglich nur in Aquarien gezogene Elodea canadensis von einem Land ins andere verschleppt worden. Die sehr lebenskräftige Pflanze hat sich in den offenen Gewässern überall stark vermehrt. Dreyssena polymorpha ist durch das Flößen von Holz immer weiter verbreitet worden etc. etc.

Nach dem Vorhergehenden kann der Ursprung der littoralen Gesellschaften des Sees ein doppelter sein. Die Organismen rühren her:

1. entweder aus den Sümpfen und Flüssen der Umgegend mit nachträglicher Anpassung an das Leben im See. Diese Arten haben den einheimischen Charakter der Typen, die das Nährbecken des Sees bewohnen;

2. oder aus der littoralen Region anderer Seen, d. h. es wurden durch passive Migration Organismen herbeigebracht, die schon an das lacustre Leben angepaßt waren. Diese Arten haben den exotischen Charakter von Typen aus vielleicht weit entfernten Ländern. Es sind das stets Arten, die besonders ausdauernd und abgehärtet sind; denn nur solche können so transportiert werden. Der Transport kann sich mehrmals wiederholen, vom zweiten See zum dritten, vom dritten zum vierten u. s. f., so daß diese Arten kosmopolitischen Charakter annehmen.

Die biologischen Gesellschaften der Tiefengewässer. Die Tiefenregion des Sees steht mit keiner anderen offenen Süßwasserregion in Verbindung. Sie ist von den Gewässern der Flüsse und Sümpfe des Einzugsgebietes und von den Gewässern benachbarter Seen durch die littorale oder die pelagische Region getrennt. Um in die Tiefenregion zu gelangen, müssen erst jene passiert werden. Nur unterirdische Wasser können direkt in Form von unterseeischen Quellen in die Tiefenregion gelangen. Daraus folgt die Möglichkeit eines doppelten Ursprunges der biologischen Gesellschaft der Tiefenregion.

Sie kann entstammen, und sie entstammt auch in der

That zum Teil, von den Organismen der littoralen und pelagischen Region, die aus irgend einem Grunde in die Tiefe gesunken sind. Diejenigen unter ihnen, die sich den hier herrschenden Lebensbedingungen anpassen, bleiben erhalten und bilden den Ausgangspunkt von Arten der Tiefenregion. Eine solche Wanderung in die Tiefe kann verschiedene Ursachen haben: pelagische Organismen, Pflanzen und Tiere, können einfach durch Hinabsinken in die Tiefe gelangen, sobald sie schwerer sind als das Wasser. Littorale Organismen gelangen in die Tiefe durch aktive Wanderung herumschweifender Arten, durch Verschleppung von Eiern, Keimen oder ausgebildeten Organismen in den längs der Gehänge absteigenden Strömungen, mögen diese auf hydrostatische, mechanische oder thermische Ursachen zurückführen; durch Massenbewegung des Bodens der littoralen Region mit den darin enthaltenen Organismen infolge von Rutschungen an den Gehängen des Sees; durch Hinabsinken der schweren littoralen Organismen, die durch Oberflächenströmungen in die pelagische Region entführt worden waren.

Wie auch die Art des Transportes ist, die Organismen der Oberflächengewässer, die die Einwanderung in die Tiefenregion überleben, erleiden hier allmählich die Modifikationen, die zur Anpassung an das neue Medium nötig sind. Die Differenzierung der Tiefenfloren und -faunen ist daher eine lokale Erscheinung, die sich am Orte selbst, in der Tiefenregion jedes einzelnen Sees vollzieht. Die Tiefenregion jedes einzelnen Sees ist, um uns eines veralteten Ausdruckes zu bedienen, ein lokales, scharf abgegrenztes „Schöpfungscentrum“.

In zweiter Linie kann die Gesellschaft der Tiefenregion den Organismen der unterirdischen Gewässer entstammen, die in großen Tiefen in den See ausmünden. Diese Organismen finden dort Lebensbedingungen, die denjenigen ihres früheren Wohnortes in den unterirdischen Seen und Flüssen beinahe genau entsprechen: gleichmäßige niedere Temperatur, absolute Dunkelheit, ein armes, kümmerliches Medium. Der einzige Unter-

schied ist die absolute Ruhe, die in dem Moment eintritt, wo die Strömung diese Organismen in den See spült. Daher vollzieht sich die Anpassung dieser Organismen sehr leicht. In der Tiefenregion der centraleuropäischen Seen von mir ausgeführte Fänge ergaben blinde Niphargus- und Asellusarten, blinde Turbellarien, die von denen der Höhlen sehr wenig abweichen.

Die pelagischen Gesellschaften. Die pelagischen Faunen und Floren nehmen unter den übrigen lacustren Gesellschaften eine Sonderstellung ein; sie sind außerordentlich kosmopolitisch. Trotz der eigentümlichen Verschiedenheit der Gruppierung der pelagischen Typen, die manchmal zu gleicher Zeit in zwei benachbarten Seen ausgeführte Planktonfänge so scharf unterscheidet, trotzdem einzelne pelagische Typen sich nur in gewissen Gegenden finden, in anderen aber nicht, zeigt doch die pelagische Gesellschaft der Süßwasserseen eine bemerkenswerte Einförmigkeit. Nicht nur die gleichen Genera, sondern sogar die gleichen Arten finden sich in den pelagischen Gewässern sämtlicher Seen des Kontinentes, um nicht zu sagen der ganzen Erde. Dieser Gleichförmigkeit liegt wahrscheinlich als innere Ursache die Entstehungsart der pelagischen Gesellschaft zu Grunde. Sie erklärt sich ungezwungen durch die Wanderungen der palmipeden Vögel, die jedes Jahr den Kontinent durchziehen und sich hier kürzere oder längere Zeit auf jedem Wassertümpel niederlassen. In wenigen Stunden fliegen sie oft von einem See zum anderen und verschleppen dabei Eier, Keime und Cysten der pelagischen Organismen des Sees, den sie eben verlassen haben. Auf diese Weise erklärt sich die Besiedelung eines neu entstandenen Sees, das Fortbestehen und die Erneuerung der pelagischen Gesellschaften, die Verschleppung einer neu differenzierten Art. Der Kosmopolitismus der pelagischen Gesellschaften erscheint als natürliche Folge ihrer Ausbreitungsweise.

Der Ursprung der pelagischen Floren und Faunen muß dem Orte nach nicht notwendig in dem See, den sie bewohnen, der Zeit nach durchaus nicht in der Gegen-

wart oder in den eben verflossenen Jahren gesucht werden. Die Differenzierung der pelagischen Arten kann sowohl zeitlich als auch räumlich in großer Entfernung erfolgt sein, also in weit entfernten Seen, vielleicht in früheren geologischen Perioden.

Wie erklärt sich nun diese Differenzierung? Der Vorgang wird uns klar, wenn wir uns die allgemeinen Charaktere der pelagischen Organismen noch einmal vergegenwärtigen. Diese pelagischen Organismen zeichnen sich unter anderem durch ihre unbegrenzt andauernde aktive oder passive Schwimmfähigkeit aus, die ihnen erlaubt, ohne feste Unterlage, ohne Stützpunkt, zu leben. Ihre große Durchsichtigkeit dient ihnen als Schutzmittel. Die passiv schwimmenden Algen sind dazu auch mit einer außerordentlichen Vermehrungsfähigkeit begabt. Der früher erwähnte Kosmopolitismus kann vielleicht auch als allgemeiner Charakter gelten; denn Organismen, die überall verbreitet sind, besitzen offenbar eine so große Widerstandsfähigkeit, daß ihr Transport oder wenigstens derjenige ihrer Keime von einem See zum anderen möglich ist. Jedes Lebewesen, das alle diese Eigenschaften besitzt, kann, wenn es zufällig in den offenen See hinaus verschleppt worden ist, sogleich und endgültig ein Glied der pelagischen Gesellschaft werden. Wir könnten hinzufügen, daß dies für jede an das Leben im See angepaßte Süßwasserart oder noch einfacher, für alle Organismen der littoralen Gesellschaft gilt.

Daß nun manche seebewohnende Tiere geradezu in die pelagische Region verbannt sind und hierher verbannt bleiben, erklärt sich einigermaßen aus ihren Gewohnheiten in Verbindung mit mechanischen Vorgängen im See. Wie oben dargelegt, vollführen in manchen Seen einige Entomostraken und Rotatoren tägliche Wanderungen; sie sind Nachttiere; während der Nacht schwimmen sie an der Oberfläche, am Tage steigen sie in die mittleren Schichten des Sees bis zur Grenze des Eindringens des Lichtes hinab. Nun kennen wir aber auch das sich täglich auf den großen Seen wiederholende Spiel der Winde, den Wechsel centrifugaler Tagwinde und cen-

tripetaler lokaler Nachtwinde. Der Nachtwind erzeugt Oberflächenströmungen, die sämtliche nachts an der Oberfläche schwimmenden Organismen in den See hinausführen. Steigen nun diese Organismen während des Tages in die Tiefe hinab, so können sie hier von der entgegengesetzten Oberflächenströmung des Tages nicht erfaßt werden. So werden sie jede Nacht weiter hinaus in den offenen See verschleppt; am Tage hingegen bleiben sie stationär. Organismen, die die eben geschilderten nächtlichen Gewohnheiten haben, werden daher notwendigerweise in den offenen See hinausgetragen. Besitzen sie die Fähigkeit, sich den neuen Lebensbedingungen anzupassen, so werden sie Mitglieder der pelagischen Gesellschaft.

Die auseinandergesetzte Theorie über den Ursprung der pelagischen Gesellschaften erklärt zwei allgemeine Thatsachen ohne Schwierigkeit:

a) Die Abwesenheit einzelner Organismen in gewissen Gegenden, die in den Seen anderer Länder weit verbreitet sind. Die klimatischen Unterschiede, besonders die Temperaturunterschiede, genügen, ein solches lokales Fehlen auch dann zu erklären, wenn man nicht annehmen will, daß den zarten Keimen eine Migration durch die Lüfte verhängnisvoll werden würde, so daß sie unmöglich auf weite Distanzen hin verschleppt werden können.

b) Die sicher konstatierte Variation einer und derselben Art von einem See zum anderen erklärt sich ungezwungen aus der Verschiedenheit der pelagischen Medien der verschiedenen Seen in Bezug auf chemische Zusammensetzung, Temperatur etc.

9. Reliktenfaunen, Reliktenseen.

Nachdem von Martens in den italienischen Seen, besonders im Benaco, Palaemonetes varians[1]) und Lovén[2]) in den skandinavischen Seen Mysis relicta,

---

[1]) von Martens, Ueber einige Fische und Crustaceen. Arch. f. Naturgeschichte XXXIII. I. 149. 1857.

[2]) Akad. d. Wissensch. Stockholm 1860.

Pontoporeia affinis, Idotea entomon gefunden hatten, wurde, gestützt auf das Vorkommen dieser Crustaceen, die alle bisher nur im Meer bekannten Gattungen angehören, die Theorie der Reliktenseen aufgestellt. Man nahm an, daß diese Seen in früherer Zeit mit dem Meer direkt zusammenhingen und von einer marinen Fauna bewohnt waren. Irgend ein geologisches Ereignis unterbrach später den Zusammenhang mit dem Ozean; der stetige Zufluß von süßem Wasser durch die Flüsse verdünnte den Salzgehalt so weit, daß gegenwärtig die Seen Süßwasser führen. Eine Anzahl von Tierarten überdauerte diese Veränderung des aquatischen Mediums; so wurden aus marinen Arten süßwasserbewohnende. Das Vorhandensein dieser eine Reliktenfauna zusammensetzenden Reliktenarten sollte den Beweis für einen früheren Zusammenhang des Sees mit dem Ozean und für die erfolgte Abschnürung desselben vom Meer bilden. Man machte aus diesen Seen Reliktenseen, indem man mit diesem Namen diejenigen Seebecken bezeichnete, die ehemals mit dem Meer in direkter Verbindung standen, heute aber durch ein vom Abfluß des Sees durchströmtes Stück Land davon getrennt sind. Dem treffenden Ausdruck Krümmels[1]) entsprechend, wäre ein Reliktensee eine Exklave des Meeres.

Soweit könnte man diese Verallgemeinerung annehmen. Man ist aber weiter gegangen. Als die Untersuchung lacustrer Faunen weitere Fortschritte machte, fand man bald in jedem Süßwassersee zahlreiche Organismen, die die Charakterzüge der marinen Tiere zeigten. Plagiostomum, Monotus, Limnocythere, Tetrastemma und zahlreiche andere marine Formen wurden von den Zoologen im Süßwasser entdeckt und als ursprünglich marine, heute im Süßwasser relikt auftretende Typen aufgefaßt. Die Seen, die sie beherbergen, wurden so in den Augen zahlreicher Forscher zu Reliktenseen. Diese Funde wurden bald so zahlreich, daß, sofern die gezogenen Schlußfolgerungen

[1]) O. Krümmel, Vergleichende Morphologie der Meeresräume. Leipzig 1879. 37.

richtig wären, alle unsere kontinentalen Seen, sogar die Mehrzahl der alpinen Seen, als Reliktenseen, d. h. als frühere Teile des Meeres aufgefaßt werden müßten.

In dieser Schlußfolgerung liegt aber eigentlich eine *petitio principii.* Findet man in einem See eine Art, die einer bisher als rein marin angenommenen Gattung angehört, so folgt doch daraus nicht, daß die betreffende Art sich an Ort und Stelle an das Leben im Süßwasser angepaßt haben muß. Ebensowenig folgt daraus, daß der betreffende See ursprünglich ein Meeresarm gewesen ist, dessen Gewässer nachträglich ausgesüßt wurden. Um diesen Schluß zu rechtfertigen, müßte doch zuerst nachgewiesen werden, daß die Art nicht aus einer anderen Gegend eingewandert sein kann. Nehmen wir an, daß die in Frage stehende Gattung nicht von Hause aus ubiquistisch, d. h. möglicherweise zugleich Meer- und Süßwasser bewohnend, sondern wirklich marinen Ursprungs sei, daß also das Fehlen ihrer Vertreter im Süßwasser nicht etwa nur der mangelhaften Untersuchung der Seen auf Rechnung zu setzen sei; nehmen wir ferner an, daß eine Art dieser Gattung sich durch progressive Anpassung an immer weniger salziges Wasser im Süßwasser angesiedelt habe, so hat doch diese Anpassung nicht notwendig in dem See, in dem wir diese Art heute finden, stattfinden müssen, sondern kann ganz wo anders stattgefunden haben, z. B. in einer Lagune, in einem Aestuar, in einem schwach salzigen Meeresarm, etwa in der Ostsee, in einem anderen Reliktensee. War die Art hier einmal an das Süßwasser angepaßt, so konnte sie auf die eine oder andere Weise durch aktive oder passive Migration weiter verbreitet werden. In der That sind die Seen durch solche Migrationen bevölkert worden. Warum sollen diese so allgemein thätigen Transportvorgänge nicht auch für ursprünglich marine, nachträglich dem Süßwasser angepaßte Organismen wirksam gewesen sein? R. Credner[1]) hat daher mit Recht in seiner schönen Studie über die Reliktenseen darauf hingewiesen,

[1]) R. Credner, Die Reliktenseen. Petermanns Mitteil. Ergänzungsheft Nr. 86 und 89. Gotha 1887 und 1888.

daß man nur dann eine Entstehung einer Reliktenfauna an Ort und Stelle annehmen darf, wenn die geologische Geschichte, die Genesis des Sees, es zuläßt. Wir verlangen mit ihm, daß die Zoologen diese unstreitig richtige Bemerkung beherzigen und, bevor sie aus einer im See gefundenen marinen Form eine Reliktenform machen, zuerst nachweisen, daß der See, in dem sie vorkommt, wirklich ein ehemaliger Meeresarm, eine Exklave des Ozeans ist.

10. Biologische Geographie der Seen.

Existieren zwischen Seen, die sich unter verschiedenen geographischen Bedingungen befinden, biologische Unterschiede? Wenn ja, in welcher Hinsicht ist dies der Fall? Wie ändert sich die tierische und pflanzliche Bevölkerung der Seen, je nachdem die Seen in Ebenen oder Gebirgen, in den Tropen oder Polargebieten, auf dem einen oder anderen Kontinent, in einem Klima mit Frost und Eisdecke, oder in einem solchen ohne Frost und Eisdecke liegen, ferner je nachdem die Seen süßes, brakiges oder salziges Wasser führen, je nachdem sie temporäre oder permanente Seen sind etc. etc.? Die Beantwortung dieser Fragen gehört der Zukunft an. Aus den zahlreichen Untersuchungen, die in den letzten Jahren ausgeführt worden sind, ergeben sich allerdings eine Menge von Einzelthatsachen und Schlußfolgerungen. Wir können aber noch keine allgemeinen Gesetze formulieren. Wenn wir es versuchten, so würden sicherlich manche derselben in kurzer Zeit Berichtigungen erfordern. Ich ziehe daher vor, davon abzusehen.

11. Physiologie der lacustren Organismen.

Alle im See lebenden Tiere und Pflanzen sind aquatische Organismen. Sogar diejenigen, die in der Luft atmen — einige Säugetiere, Insekten, Mollusken — sind gänzlich oder in einem Teil ihrer Organisation dem Leben im Wasser angepaßt. Die Atmung in der Luft selbst wird

durch die dem Leben im Wasser eigenen Bedingungen modifiziert. Ich gebe im folgenden eine Uebersicht über das, was bezüglich der Physiologie der aquatischen und speziell der lacustren Lebewesen festgestellt ist.

A) Einfluß der physikalischen Eigenschaften des Mediums.

Dichte. Die lacustren Organismen leben im Wasser, d. h. in einem Medium, dessen Dichte ungefähr derjenigen ihres Körpers entspricht [1]). Infolgedessen benötigen sie weit weniger Schutzmittel und Vorrichtungen, die ihre Formen erhalten und am Zusammensinken verhindern, als die in der Luft lebenden Organismen. Sie können weich, gallertartig, fast flüssig sein. An die Luft gebracht, fallen sie zusammen; im Wasser behalten sie ihre Gestalt, ebenso wie ein Tropfen Oel im Wasser seine sphärische Form behält.

Aquatische Pflanzen und Tiere sind verhältnismäßig weniger resistent und fest gebaut, als die in der Luft lebenden. Im Wasser sind Stoß- und Druckwirkungen weniger heftig als in der sämtlichen Bewegungsformen nur schwachen Widerstand entgegensetzenden Luft.

Je nachdem ihre mittlere Dichte höher oder geringer ist, als diejenige des Wassers, schwimmen die aquatischen Organismen an der Oberfläche oder schweben mitten im Wasser oder sinken unter. Eine Anzahl besitzt hydrostatische Vorrichtungen, die es ihnen ermöglichen, ihre Dichte auf diejenige des Wassers zurückzuführen, so die Fische in ihren Schwimmblasen, gewisse Algen in ihren Oeltropfen und Gasvacuolen etc.

Druck. Der hydrostatische Druck übt auf feste und flüssige Körper keinen nennenswerten Einfluß aus.

---

1) Die Dichte organischer Substanzen ist:

Proteinsubstanzen	1,3
Fette	0,9
Knochen und Schalen	1,8—2,0
Cellulose	1,5

Hierzu ist zu bemerken, daß die Körper der lacustren Organismen zum größten Teil aus Wasser bestehen, so daß sich ihre Dichte in der That derjenigen des Wassers nähert.

Die Kompression, der die Gewebe der Organismen bei zunehmendem Druck unterworfen sind, ist relativ gering. Sie entspricht ungefähr derjenigen, die das Wasser erfährt, in dem sie sich befinden. Infolgedessen wird das Verhältnis ihrer mittleren Dichte zu derjenigen des umgebenden Wassers nicht wesentlich verändert, mögen die Organismen an der Oberfläche schwimmend, dem einfachen atmosphärischen Druck oder in großen Tiefen lebend, gewaltigen Pressionen ausgesetzt sein. Im Gegensatz dazu unterliegen die gasförmigen Körper bei Druckänderungen sehr bedeutenden Volumenänderungen. Ihr Volumen ist dem auf ihnen lastenden Drucke umgekehrt proportional. Ein an der Oberfläche befindliches Volumen eines gasförmigen Körpers wird in 10 m Tiefe, wo der Druck 2 Atmosphären beträgt, auf die Hälfte, in 20 m auf ein Drittel, in 300 m, wo ein Wasserdruck von 30 Atmosphären zum normalen Luftdruck einer Atmosphäre hinzukommt, auf $^1|_{31}$ reduziert.

Jeder Organismus, der in seinem Körper und in seinen Geweben Gase enthält, erleidet daher bedeutende Volumänderungen, wenn er sich aktiv oder passiv von einer Schicht des Sees in eine andere begibt. In großen Tiefen wird er zusammengepreßt, verkleinert, beim Aufsteigen an die Oberfläche dehnt er sich wieder aus. Diese Erscheinung ist besonders bei den mit geschlossenen Schwimmblasen versehenen Fischen wichtig, die in vertikaler Richtung bedeutende Wanderungen unternehmen. Solange diese Wanderungen freiwillig geschehen, ist das Tier im stande, sie so weit zu verlangsamen, als erforderlich ist, um die Uebergänge allmählich zu gestalten. Beim Aufsteigen findet Auflösung des Gases im Blut, beim Absteigen Ausscheidung des Gases aus dem Blut in der Weise statt, daß die Schwimmblase ungefähr das gleiche Volumen behält und so dem ganzen Körper des Fisches in jeder Tiefe diejenige Dichte gewährleistet, die es ihm ermöglicht, sich im Wasser ohne allzu heftige aktive Bewegungen schwebend zu erhalten. Wenn aber der Transport plötzlich und wie mit einem Ruck erfolgt, wie bei den Fischen, die das Netz

des Fischers aus großen Tiefen heraufholt, so ist der Uebergang zu rasch. Die Schwimmblase, die eine plötzliche Druckerniedrigung erleidet, dehnt sich außerordentlich stark aus, die Eingeweide werden durch das Maul oder durch die Kloake hinausgepreßt; der Fisch erstickt. Man hat sogar Fische, die aus sehr bedeutenden Tiefen heraufgeholt wurden, geradezu platzen sehen.

Es gibt noch andere Fälle, bei denen der Einfluß des hydrostatischen Druckes auf die gasförmigen Körper von Wichtigkeit ist, so bei tierischen Leichen. Die Leichen von Menschen, die in einem Teiche oder in einem Fluß ertrunken sind, steigen einige Tage nach dem Tode an die Oberfläche empor, sobald infolge der eintretenden Verwesung sich in den Geweben und Organen Gase bilden, die den Körper auftreiben, ohne sein Gewicht zu vermehren. Ganz anders liegen die Verhältnisse bei einem in großer Tiefe liegenden Kadaver. Die Verwesungsgase, die sich übrigens infolge der niederen Temperatur der tiefen Schichten weit langsamer entwickeln, werden durch den äußeren Druck komprimiert, nehmen nur ein geringes Volumen an und treiben die Leiche nicht genügend auf, um deren Aufsteigen an die Oberfläche zu veranlassen. Ein Aufsteigen von Leichen aus 100, vielleicht sogar aus 50 und 30 m Tiefe ist noch nie beobachtet worden.

Das Gleiche gilt von den Leichen der Fische, die im Winter während ihrer Wanderungen in den mittleren und tiefen Schichten des Sees verenden. Im Winter sieht man höchst selten eine Fischleiche an der Oberfläche des Wassers treiben, und doch sterben diese Tiere sicherlich zu jeder Jahreszeit.

Die Leichen der in den Oberflächenschichten schwimmenden pelagischen Entomostraken hingegen verwesen infolge der hohen Temperatur des Wassers rasch. Es bildet sich in ihren Geweben ein Gasbläschen, dessen Volumen durch den Druck nicht verkleinert wird. Der Körper schwimmt an der Oberfläche. Daher rührt wahrscheinlich der sogenannte „Fischgeruch“, den man an der Oberfläche des Sees öfter wahrnimmt. Es ist

der den Naturforschern, die pelagische Fischerei getrieben haben, wohlbekannte Geruch nach Crustaceen. Unsere Planktonnetze riechen immer stark nach „Fisch".

Die vegetabilischen Fragmente, die durch die Zuflüsse in den See gelangen, schwimmen so lange, als ihre Gewebe und Zellen Luft enthalten. Sobald diese gelöst und durch Wasser ersetzt ist, sinken Holz, Wurzeln, Stengel, Blätter unter und gelangen auf den Grund des Sees.

Wärme. Das Wasser besitzt eine außerordentlich große spezifische Wärme. Es folgt daraus, daß jeder in das Wasser gebrachte Körper, es sei denn, daß er selbst Wärme entwickelt, sehr bald die Temperatur des Mediums annimmt. Deshalb ist die Temperatur der meisten aquatischen Tiere variabel, d. h. ihre Körperwärme entspricht ungefähr derjenigen der Wasserschicht, in der sie leben. Das ist bei den Amphibien, den Fischen und sämtlichen Invertebraten der Fall.

Unter den im See lebenden Tieren besitzen nur einige Säugetiere und Wasservögel eine konstante Temperatur, die oft bedeutend höher ist, als diejenige des Wassers, in dem sie schwimmen. Durch verschiedenartige Mittel geschützt, behält ihr Körper seine hohe Temperatur ohne allzu großen Verbrauch von wärmeerzeugenden Substanzen. Die im Gefieder der Vögel oder im Pelze der Säugetiere (Otter, Biber) befindliche isolierende Luftschicht, oder die dicke Fettlage im Hypoderm der Floßenfüßler spielen die Rolle eines schlechten Wärmeleiters und schützen die Tiere vor zu großen Wärmeverlusten.

B) Physiologie der vegetativen Funktionen.

Atmung. Aquatische Pflanzen und Tiere nehmen den Sauerstoff des Wassers auf und geben als Produkt innerer Oxydationsvorgänge Kohlensäure ab. Der Sauerstoff, im Wasser gelöst oder in der Luft mit anderen Gasen gemengt, gelangt endosmotisch durch die schützenden Gewebe in die Lebenssäfte der Organismen.

Die im Wasser gelöste Luft enthält mehr Sauerstoff als die Atmosphäre. Ungefähr ein Drittel ihres Volumens besteht aus Sauerstoff. Allein das im Wasser gelöste Luftvolumen ist so gering, daß in einem Liter Wasser doch nur 7 cm^3 Sauerstoff vorhanden sind, während die entsprechende Menge in einem Liter Luft 207 cm^3 beträgt. Die aquatische Atmung verfügt also über 30mal weniger Sauerstoff als die atmosphärische. Daher muß die Atmung bei den Wassertieren weniger energisch oder aber ihr Atmungsapparat vollkommener sein als derjenige der in der Luft lebenden Tiere. Beides kommt, vielleicht sogar im gleichen Organismus vereint, vor. Einerseits sind die Oxydationsvorgänge bei den Tieren mit aquatischer Atmung weniger energisch. Es fehlt diesen Tieren die konstante Temperatur, zu deren Erhaltung in gewissen Fällen eine enorme Wärmeproduktion und folglich ein sehr energischer Atmungsprozeß nötig ist. Andererseits ist der aquatische Atmungsapparat vollkommener oder vielmehr ausgiebiger, als der atmosphärische. Die Kieme, in der ein kontinuierlicher Strom sauerstoffhaltigen Wassers den feinen kapillaren Blutgefäßen fortwährend frische Flüssigkeit zuführt, bewirkt einen weit energischeren Gasaustausch als der Lungensack der Vertebraten und Mollusken oder die Trachee der Insekten, in denen die Luft sich nur langsam und unvollständig erneuert, und die frische Luft, erst nachdem sie sich mit den Residuen der vorhergehenden Atemzüge gemischt hat, mit dem Blut in Berührung kommt. Die Wasserpflanzen atmen durch ihre ganze fortwährend vom Wasser umspülte Oberfläche.

Außer den aquatischen Tieren mit Kiemen- oder Hautatmung, finden wir solche, die in der Luft atmen. In oder auf dem Wasser lebend, atmen sie im Vergleich zu den ihnen verwandten tierischen Typen ganz abnorm.

Die zur Klasse der Säugetiere gehörenden aquatischen Vertebraten (Fischotter, Seehund etc.), die Vögel (Palmipeden), die Reptilien (Schildkröten, Krokodile etc.), die Amphibien (Molche und Frösche) schwimmen an der

Oberfläche, wo sie atmosphärische Luft einatmen. Sie tauchen unter Wasser, um Nahrung zu suchen. Die meisten widerstehen daher der Erstickung längere Zeit. Für Seehunde und Fischottern liegen keine Beobachtungen vor; wir wissen jedoch, daß die Wale bis zu 30 Minuten unter Wasser bleiben können. Die Ente erstickt erst nach 10 Minuten langer Submersion (Bert). Der Frosch widersteht dem Erstickungstode während des Sommers stundenlang, während des Winters wochen- und monatelang (Edwards). Die Hautatmung scheint beim Frosche genügend zu sein, um das Leben zu erhalten. Bei den Säugetieren und Vögeln scheint diese Widerstandsfähigkeit zum Teil auf der großen, in ihren Gefäßen enthaltenen Blutmenge zu beruhen, die ein Reservemagazin für den Sauerstoff darstellt. Vielleicht beruht sie auch auf gewissen Eigenheiten des venösen Systems, auf der Dilatation der Abdominalvenen, auf venösen Sphinktern, die, die Blutzirkulation verlangsamend, den Zufluß von zu stark mit Kohlensäure beladenem Blut zu den Nervencentren verhindern.

Die aquatischen Insekten mit atmosphärischer Atmung besitzen Einrichtungen, die sie befähigen, Vorräte von Luft, die sie an der Oberfläche geschöpft haben, mit in die Tiefe zu schleppen. Die Larven der durch Kiemen atmenden Insekten, wenigstens diejenigen, die in seichten Gewässern leben, besitzen einen Luftapparat. Ihre Kiemen sind voll Luft. Bei denjenigen, die in den mittleren und tiefen Schichten des Sees leben, ist das nicht der Fall. Da sie keine Verbindung mit der Atmosphäre unterhalten, erhalten sie keine Luft, mit der sie ihre Tracheen füllen könnten. Diese enthalten nur Wasser. Erst wenn man sie an die Oberfläche heraufgeholt hat, bemerkt man in ihren Geweben das Auftreten von schwarzen, stark lichtbrechenden Röhren, die beweisen, daß in ihrem Atmungsapparat Luft existiert.

Es finden sich in der tiefen Region des Sees, ja sogar auf der Uferbank bei 2 und 4 m Wassertiefe lungenatmende Mollusken (Limneen), denen gleichwohl die Fähigkeit, an der Oberfläche Luft zu schöpfen, abgeht.

Ihre Lungensäcke enthalten keine gasförmige Luft. Deshalb muß die Atmung dieser Gasteropoden beinahe ausschließlich durch die Haut erfolgen.

Die Ernährung. Die lacustren Organismen ernähren sich durch Aufnahme von Wasser und der darin gelösten verschiedenen Substanzen, sowie durch Aufnahme der im Wasser suspendierten oder auf den Grund gesunkenen organischen Körper. Diese beiden Ernährungsarten finden sich manchmal, besonders bei Vertretern des Tierreichs, gleichzeitig vereint. Betrachten wir die verschiedenen Gruppen der Organismen.

1. Chlorophyllfreie Pflanzen. Pilze und Algen absorbieren aus dem umgebenden Medium die gelösten stickstoffhaltigen Substanzen und Kohlehydrate. Dies ist besonders auffallend bei den an den Ausmündungen der Abflußkanäle wachsenden Cladothrix, Sphaerotilus etc., Algen, die in dem Abfallwasser eine wahre Nährbouillon finden. Das Gleiche ist bei den gemeinhin als „Verwesungsagenten“ lebender und toter Organismen bezeichneten freien Bakteriaceen und den Phycomyceten (Saprolegineen etc.) der Fall. Sie entwickeln sich in den Geweben, leben, ernähren und vermehren sich, indem sie die ersteren in ihre chemischen Elemente zerlegen. Es fragt sich nur, ob sie wirklich direkt die organischen Gewebe angreifen? Das ist kaum wahrscheinlich, sehen wir doch, daß die Nährflüssigkeiten der Bakteriologen Medien darstellen, in denen sich diese kleinen Organismen so rasch und regelmäßig entwickeln und vermehren, daß man darauf eine Zählungsmethode der Mikroben hat basieren können. Es scheint wahrscheinlich, daß die bei der Verwesung mitwirkenden Schizomyceten sich nur von gelösten Substanzen ernähren und daß sie durch die rasche Absorption der durch ihre außerordentlich intensive Lebensthätigkeit und Vermehrung gelösten Substanzen die chemischen Dissoziationsvorgänge immer wieder ermöglichen und begünstigen. Bei Abwesenheit der Mikroben unterbleiben die Verwesungsvorgänge, unterbleibt die Entwickelung von Kohlensäure, Methan und Ptomainen.

2. Chlorophyllführende Pflanzen. Neben dem eigentlichen Ernährungsvorgang, durch den sie die anorganischen Elemente aufnehmen, zeigen sie die bemerkenswerte, auf der Thätigkeit des Chlorophylls beruhende Funktion der Assimilation, durch die sie die im Wasser reichlich vorhandene Kohlensäure zersetzen und Sauerstoff abgeben. Aus dem gewonnenen Kohlenstoff werden die Kohlehydrate und in Verbindung mit den anorganischen Substanzen die Proteide aufgebaut. Die anorganischen Stoffe werden direkt aus dem Wasser in gelöster Form durch die Membranen der Gewebe aufgenommen. Ein Teil dieser Substanzen mag wohl auch durch die Wurzeln in das Innere der Pflanzen gelangen. Man hat in der That beobachtet, daß gewisse Pflanzen (Elodea canadensis) den Boden rasch erschöpfen, was kaum erklärlich wäre, wenn die Wurzeln, wie gewöhnlich angenommen wird, nur als Haftorgan funktionierten. Desgleichen ist die Abwesenheit der bewurzelten Pflanzen im sterilen Sand der Uferbank ein Beweis für die Richtigkeit der Annahme, daß den unterirdischen Organen im Ernährungsprozeß eine aktive Rolle zukommt.

3. Die pflanzenfressenden Tiere finden im ganzen Littoral, wo Phanerogamen und Kryptogamen üppig wachsen, reichliche Nahrung. In der pelagischen Region ist ihre Nahrung schon spärlicher, da sie nur aus schwimmenden oder schwebenden Algen und aus den zufällig durch Winde und Strömungen vom Lande und vom Littoral her verschleppten Pflanzenresten besteht. In der Tiefenregion des Sees findet sich vegetabilische Substanz nur bis zu 50 und 100 m Tiefe und zwar nur in Form der kümmerlichen, den organischen Filz bildenden Algen. In größeren Tiefen fehlt sie ganz.

4. Die omnivoren Tiere, die von toten Ueberresten und von Bruchteilen oder ganzen pflanzlichen und tierischen Organismen leben, treffen im ganzen See reichlich Nahrung. Sogar in der tiefen, so überaus armen Region finden sie durch Zufuhr organischer Körper ihren Unterhalt. Die schweren pelagischen Organismen sinken

nach ihrem Absterben unter und führen der tiefen Region fortwährend neue, in den erleuchteten Schichten des Sees aufgebaute Nährstoffe zu.

5. Die fleischfressenden Tiere finden ihre Nahrung überall. Die großen und starken fressen die kleineren und schwächeren, die, abgesehen vielleicht von den unteren Schichten der pelagischen Region, zahlreich in sämtlichen Regionen vorkommen. Die pelagischen Tiere steigen bei ihren täglichen Wanderungen kaum tiefer als 40—60 m hinab. Die Tiere der Tiefenregion bewohnen sämtlich den Schlamm des Bodens und steigen nicht in die darüber liegenden Wasserschichten empor. Einzig die Leichen der pelagischen Organismen passieren während ihres langsamen Sinkens diese tiefen Wasserschichten. Aber auch hier auf diesen Leichen fehlt das Leben nicht, denn die Fäulnismikroben haben sich auf ihnen festgesetzt und wuchern üppig.

Was die Nahrungsaufnahme, das Essen selbst, wenn dieser Ausdruck gebraucht werden darf, betrifft, so zeigt sich bei den meisten in den verschiedenen Regionen des Sees frei oder festsitzend lebenden Tieren nichts Bemerkenswertes. Eigentümlichkeiten zeigen nur einzelne den Boden bewohnende Tiere, die sich infolge ihres Aufenthaltes im Schlamm unter ganz eigenen Verhältnissen befinden. Wir gehen daher auf die frei lebenden oder auf den Alluvionen des Seegrundes laufenden, kriechenden, hüpfenden Tiere hier nicht ein und beschränken uns darauf, einige in Röhren lebende interessante Typen speziell zu erwähnen. An Arten wenig zahlreich, ist ihre Individuenzahl ungeheuer groß, so daß sie in der Bildung der Seealluvionen eine wichtige Rolle spielen. Es sind chätopode Anneliden (Tubifex, Saenuris etc.), nematode Würmer (Mermis, Dorylaimus etc.) und Larven von Dipteren (Chironomus, Tanypus etc.). Diese wurmartigen Tiere graben im Schlamm cylindrische Galerieen, deren Wände oft mit einem seidenartigen Gewebe überzogen sind. Um zu atmen oder Nahrung zu sich zu nehmen, Verdauungsrückstände zu entleeren, strecken sie sich bis an die Oeffnung ihres

Baues vor; bei drohender Gefahr von seiten ihrer Feinde ziehen sie sich in das Innere des Baues zurück. Die Galerieen durchziehen den Boden in Form zahlreicher Kanäle, in denen das Wasser frei zirkuliert. Statt kompakt zu sein, ist der Boden hier von den limikolen Tieren unterhöhlt und durchwühlt. Ohne diese Tiere würden die übereinander geschütteten Lagen lacustrer Alluvionen eine kompakte Masse bilden, in der die organische Materie, soweit sie sich nicht sofort zersetzt und löst, definitiv begraben und konserviert würde. So aber erstreckt sich der Vorgang der Ausnützung der organischen Substanz bis in eine Tiefe von mehreren Centimetern in den Boden hinein und ist deshalb um so vollständiger.

Verweilen wir noch ein wenig bei diesem Vorgang; derselbe ist von der auf der Landoberfläche in freier Luft erfolgenden Humusbildung wesentlich verschieden. Bei der Humusbildung wird die Oberfläche der Gesteine durch die Atmosphärilien, durch die Vegetation und durch Tiere angegriffen. Die Lumbriciden besonders führen die Erde in Humus über. Die Kohlensäure der Luft löst die Kalkgesteine und die Feldspate. Die durch Blitzschlag oder infolge der Thätigkeit von Verwesungsagenten aus dem Stickstoff der Luft gebildeten Nitrite und Nitrate werden durch die Pflanzen absorbiert und gelangen bei deren Verwesung als Humussäuren und ammoniakalische Verbindungen in den Boden. Das Gleiche findet bei der Verwesung tierischer Leichen statt. Es kommt schließlich zur Bildung einer oberflächlichen Humusschicht, die nur durch Einbeziehung des darunterliegenden Erdreiches an Mächtigkeit zunimmt. Der fremde, von atmosphärischem Sand und Staub herrührende Zuwachs ist — von den trockenen Steppengebieten, die humusarm sind, abgesehen — so gering, daß er vernachlässigt werden kann. Die Dicke dieser Schicht schwankt je nach den klimatischen Bedingungen. In gewissen Regionen ist sie sehr gering, in anderen, z. B. in den Wäldern der Tropen, in den Torfmooren kann sie eine bedeutende Mächtigkeit erreichen. In

keinem Fall wächst jedoch die humöse Schicht unbegrenzt an.

Die am Grunde der stehenden Gewässer (Seen und Meere) abgelagerten Alluvionen verhalten sich ganz anders. Sowohl Flußanschwemmungen als auch Seealluvionen werden in immer neuen, zuweilen sehr bedeutenden Mengen zugeführt, so daß die Alluvialschicht am Grunde des Sees an Mächtigkeit fortwährend zunimmt. Zur gleichen Zeit fallen aber auch organische Substanzen, die Leichen der pelagischen Organismen, auf den Grund. Es würde daher ein Gestein von gemischter Zusammensetzung, zum Teil anorganischen, zum Teil organischen Ursprunges entstehen, wenn die organischen Bestandteile nicht zerstört würden. Von den omnivoren Tieren der Tiefenfauna werden sie gefressen, von den Algen des organischen Filzes in gelöster Form absorbiert und zuletzt werden sie die Beute der Verwesungsmikroben. Diese sind zuerst in der obersten Schicht thätig, setzen aber ihr Zerstörungswerk fort, auch wenn sich eine neue Schicht über die erste gelagert hat. Dieser Vorgang findet im Innern des Seeschlammes um so leichter statt, als das Wasser in den zahlreichen, von den röhrenbauenden limikolen Tieren erstellten Galerieen frei zirkuliert. Wenn man Seeschlamm, der geraume Zeit in einem durchsichtigen Glasgefäß gestanden hat, betrachtet, so bemerkt man sehr bald, wie die Galerieen der Anneliden und Larven, die die Masse nach allen Richtungen durchziehen, von den Verwesungsgasen angefüllt werden. Sobald das Gasvolumen genügend groß geworden ist, entweichen Gasbläschen aus dem oberen Ende der Röhren. Die organischen Reste werden in der Oberflächenschicht des Seeschlammes durch die Verwesungsvorgänge so vollständig zerstört, daß in den unteren Schichten keine Spur mehr davon vorhanden ist. Die definitiven lacustren Alluvionen als geologische Bildung sind reiner Mergel, reiner Thon oder reine Seekreide ohne wesentliche Spuren organischer Beimengungen.

Was die Physiologie der Ernährung der lacustren Organismen im engeren Sinne anbelangt, so kann ich

über diesen Vorgang nichts Besonderes angeben, da ich keine Gelegenheit hatte, genügende Beobachtungen in dieser Richtung anzustellen.

C) Physiologie der animalischen Funktionen.

Die Empfindungs- und Bewegungsfähigkeit der lacustren Organismen scheint nichts Bemerkenswertes zu bieten. Ein spezieller Punkt allerdings muß ausgenommen werden; er betrifft das Sehvermögen.

Dieses hängt einerseits von der Helligkeit, andererseits von der Durchsichtigkeit des Mediums ab. Die oberen Schichten des Sees sind beinahe so hell wie die Atmosphäre. Am Tage wirkt das Sonnenlicht in beiden Medien gleich; in beiden herrscht nachts die gleiche Finsternis.

Im Wasser sind die von den Jahreszeiten abhängigen Schwankungen der Helligkeit etwas stärker accentuiert. Der Einfluß der Sonnenhöhe über dem Horizont macht sich stärker bemerkbar als in der Luft. In den mittleren und tiefen Schichten ist die Helligkeit viel weniger intensiv als an der Oberfläche. Die starke Absorption im durchsichtigen wässerigen Medium, der undurchsichtige, durch die übereinander gelagerten feinen suspendierten Staubteilchen gebildete Schirm, die partielle Reflexion und die Refraktion, denen die Sonnenstrahlen beim Eindringen in das Wasser unterworfen sind, bewirken, daß das Sonnenlicht nur wenig tief in den See eindringt und seine Wirkung nur während weniger Tagesstunden geltend machen kann. Im Sommer sind die mittleren Schichten wegen der größeren Trübung der Gewässer weniger hell, als sie es sein könnten. Ebenso im Winter trotz des klaren Wassers, weil die Sonne niedriger steht. In den tiefen Schichten des Sees aber herrscht absolute Finsternis. Wir können das aus der mit der Tiefe rasch schwindenden Einwirkung der photochemischen Strahlen auf lichtempfindliche Substanzen ersehen (Experimente mit Chlor- und Brom-Jodsilber[1]). Bald schon treffen

[1]) Vergl. oben S. 140.

wir auf Schichten, in denen selbst die empfindlichsten Platten keine Lichteinwirkung mehr zeigen. Wir ersehen es ferner daraus, daß in größeren Tiefen chlorophyllhaltige Pflanzen, die zum Leben der Einwirkung des Lichtes bedürfen, absolut fehlen.

Damit soll aber nicht gesagt sein, daß die Empfindlichkeit der optischen Nerven der Tiere die gleiche sei, wie diejenige der lichtempfindlichen Substanzen, zu denen wir bei unseren Experimenten im See greifen müssen. Wir wissen, daß genügend lang exponierte sehr empfindliche Gelatineplatten den Astronomen Sterne an Stellen zeigen, wo das Auge selbst mit dem stärksten Teleskop nichts zu sehen vermag. Wir wissen ferner, daß dieselbe lichtempfindliche Platte, ganz kurze Zeit exponiert, von denjenigen Sternen, die wir mit bloßem Auge erkennen können, nichts zeigt. Und doch unterscheidet unser Auge Sterne bis zur 6. Größe. So ist unser Auge weit empfindlicher als selbst die allerempfindlichste Platte, wenn es auch nicht wie diese die Fähigkeit hat, durch Verlängerung der Zeitdauer eines Lichteindrucks diesen zu verstärken.

Einige, leider noch allzu seltene biologische Beobachtungen berechtigen uns zur Annahme, daß Licht, welches wahrgenommen werden könnte, in den großen Tiefen völlig fehlt. Es sind das 1. die Anwesenheit von blinden Tieren (allerdings müssen einzelne derselben der Höhlenfauna zugerechnet werden); 2. das Verschwinden der Augen bei einzelnen Individuen von Arten, die normal Augen besitzen; 3. die Abschwächung der Pigmentierung bei den Tieren der tiefen Region und endlich 4. die Analogie mit den großen Tiefen des Ozeans, in denen völlig blinde Arten und solche mit überaus großen Augen eine beinahe völlige oder gänzliche Finsternis anzeigen.

Der zweite, für das Sehen im See wichtige Faktor ist die größere oder geringere Durchsichtigkeit des Wassers. In der littoralen Region besonders ist die Durchsichtigkeit des Wassers während des Sommers durch die im Wasser suspendierten Staubteilchen stark beein-

trächtigt. Ein weiter Ausblick ist keinem Tier möglich; es ist fortwährend wie von einem Nebel umgeben; bis zum letzten Augenblick bleibt ihm die Annäherung seiner Feinde verborgen. Der Gesichtskreis hat oft selbst für Fische mit ausgezeichnetem Sehapparat nur einen Radius von wenigen Metern. Viele eigentümliche Gewohnheiten der im See lebenden Tiere, insbesondere der Fische, erklären sich aus diesen Bedingungen, die von denjenigen wesentlich abweichen, unter denen die Tiere auf dem Lande existieren.

12. Der Kreislauf der organischen Materie.

Die mineralischen Bestandteile, die durch die Zuflüsse in den See geschafft werden, erleiden ziemlich einfache Schicksale. Die suspendierten Teile werden durch Kolmatierung auf dem Boden abgesetzt, die gelösten durch den Abfluß in das Meer entführt; nur in den Endseen gesellen sich auch die letzteren den Alluvionen zu. Die organischen Substanzen hingegen machen mannigfaltige Wandlungen durch.

Woher kommen sie?

Der Regen und die übrigen atmosphärischen Niederschläge, wie Schnee, Hagel u. s. w. führen dem See Ammoniak, Kohlensäure, salpetrige und Salpetersäure zu. Die Atmosphäre bereichert den Binnensee mit organischen Substanzen in Form von Staub, Organen oder ganzen Organismen, mit den vom umgebenden Lande stammenden Leichen und Ueberresten tierischer und pflanzlicher Organismen. Die Zuflüsse schleppen als Produkt der Entwässerung des ganzen Einzugsgebietes gelöste organische Substanzen herbei, ebenso auch Sekretionen und Verwesungsprodukte der in ihrem Einzugsgebiet in den Flüssen, Sümpfen, Abflußkanälen etc. lebenden Organismen. Desgleichen bringen sie Leichen und Leichenüberreste, sowie lebende Individuen der auf dem Lande wohnenden Organismen mit sich in den See.

Durch diese drei Nährquellen werden bedeutende Mengen organischer Substanzen im See angehäuft. Man

findet die letzteren im See in drei Formen: in Form gelöster organischer Verbindungen; in Form toter organisierter organischer Verbindungen d. h. Leichen und Abfällen von Pflanzen und Tieren; in Form von lebenden organisierten organischen Verbindungen, d. h. lebenden Pflanzen und Tieren.

Was wird nun aus ihnen?

A) *Die gelösten organischen Verbindungen* werden zum Teil durch die im See lebenden Organismen assimiliert, zum Teil durch den Verwesungsprozeß oder durch chemische Vorgänge in einfachere, gasförmige Verbindungen zerlegt, die in die Luft entweichen, zum Teil endlich durch den Abfluß weggeführt.

B) *Tote organische Substanz* in Form von Leichen und Ueberresten. Ein Teil derselben fließt im Wasser des Abflusses ab. Ein anderer wird durch den Wellenschlag an das Ufer geworfen, wo er sich als wahrer Damm von Abfällen ansammelt. Bei Sturm werden diese Ansammlungen wieder im See zerstreut, oder als Staub in die Atmosphäre entführt; ein anderer Teil endlich wird im Alluvium begraben und wird zum Fossil. Ein Teil dieser organischen Substanz dient den omnivoren Organismen als Nahrung und gelangt so wieder in den Kreislauf der lebenden organischen Materie; ein anderer Teil wird durch die Angriffe von Fäulniserregern, Pilzen, Bakterien etc. zerstört und gelangt so in den Kreislauf der gelösten organischen Körper.

C) *Die organisierten organischen Verbindungen*, lebende Tiere und Pflanzen. Solange sie leben, assimilieren diese Lebewesen selbst organische und mineralische gelöste oder feste Verbindungen, von denen sie einen Teil in ihren Geweben als organisierte Substanz aufhäufen, einen andern Teil in Form von gelösten oder gasförmigen Exkretionen wieder freigeben. Diese letzteren fallen alsdann unter unsere Gruppe A. Verenden diese Organismen, so geschieht dies entweder durch natürlichen Tod; sie erleiden alsdann die Schicksale der Substanzen der Gruppe B; oder sie werden durch pflanzen- und fleischfressende Tiere verschlungen

und verbleiben so im Kreislauf der lebenden organischen Materie.

Man kann die Wandlungen und Migrationen, denen die organischen Substanzen im See unterworfen sind, wie folgt, zusammenfassen.

Die lacustren Pflanzen nehmen die zu ihrer Nahrung nötigen Substanzen direkt in Form von Lösungen aus dem umgebenden Wasser auf. Durch Endosmose gelangen die anorganischen Verbindungen (Ammoniaksalze, Phosphate, Sulfate, Nitrate, Chloride, Nitrite, Karbonate etc.) der dem Pflanzenleibe unentbehrlichen Elemente (Kalium, Calcium, Magnesium, Eisen etc.) in das Innere der Pflanze. Sodann absorbiert die Pflanze die im Wasser gelöste Kohlensäure und verarbeitet sie zu verschiedenen Kohlehydraten, insbesondere zu Stärke. Die Kohlehydrate gehen mit den eben genannten Körpern chemische Verbindungen ein und bilden Eiweissstoffe, Protoplasma etc. Die so entstandenen lebenden organischen Verbindungen leben aber nicht ewig. Ein kleiner Teil nur bleibt nach dem Grundsatz der Kontinuität der embryonalen Substanz als Samen oder Keim erhalten und beginnt den Kreislauf von neuem. Der Körper der Pflanze aber wird durch die herbivoren Tiere gefressen, oder er stirbt ab und wird durch Verwesung wieder in gasförmige oder gelöste Produkte übergeführt. Ein sehr kleiner Teil des Pflanzenleibes wird auch von der Sedimentation ergriffen und gelangt in die Alluvionen des Grundes oder wird durch den Abfluß in das Meer entführt.

Die im See lebenden Tiere vermögen einen Teil der im Wasser gelösten Substanzen direkt zu assimilieren und zu organisieren. Sie bauen ihre Kiesel- und Kalkskelette aus gelösten Substanzen auf. Das durch ihre Verdauungsorgane gehende Wasser führt ihnen sicherlich etwas assimilierbare, gelöste organische Substanz zu. Der größte Teil ihrer Nahrung stammt jedoch von den vegetabilischen Organismen, die sie direkt (Pflanzenfresser und Omnivoren) oder indirekt (Fleischfresser) verzehren.

Die vegetabilische Substanz bildet den Grundstock der animalischen Nahrung jeder Art. Die Wandlungen

und Wanderungen, die eine Pflanze, eine Alge zum Beispiel durchmacht, sind mannigfaltig. Eine Diatomee wird durch eine Rotatore gefressen, diese durch eine Cladocere, diese durch einen insektivoren Fisch, dieser durch einen Raubfisch, der endlich einer Fischotter oder dem Fischer zum Opfer fällt. Die Kleinen und Schwachen werden von den Großen und Starken verspeist und diese werden schließlich selbst ein Raub der Allerkleinsten, der Fäulnisbakterien.

Nach der Inkarnation im Tiere wird die organische Substanz entweder organisiert oder in gelöstem Zustande abgeschieden.

Wie der Prozeß auch verlaufen mag, das Schlußresultat ist immer dasselbe. Die organische Substanz kehrt immer wieder in die große Vorratskammer, den See, zurück, sei es in Form von tierischen Sekretionen, wie Kohlensäure, Harnstoff und anderen Produkten der tierischen Verbrennungsvorgänge, oder nach dem Tode der Organismen als Produkte ihrer Verwesung.

Eine Ausnahme bildet nur diejenige organische Substanz, die durch den Abfluß aus dem See entführt wird und die kleinen Mengen, die durch die fischenden oder in den gefischten Tieren dem See entnommen werden. Die durch Mensch, Fischotter oder Vögel gefangenen Fische, die geflügelten Formen der seebewohnenden Insekten, die von Fledermäusen, Schwalben etc. weggeschnappt oder vom Winde vertragen werden, die tierischen und pflanzlichen durch Wellenschlag auf den Strand geworfenen Ueberreste werden dem lacustren Kreislauf entzogen und kehren zeitweise in den Kreislauf des Bodens oder der Luft zurück.

13. Der See als Mikrokosmos.

Wie wir soeben gesehen haben, befindet sich die organische Materie in einem fortwährenden Kreislauf zwischen der Inkarnation in lebenden Organismen und der Zerstörung dieser Organismen nach ihrem Absterben, zwischen der Auflösung im flüssigen Medium und der

Verflüchtigung in der darüber liegenden Atmosphäre. Die gelöste organische Substanz stellt einen unerschöpflichen, stets erneuerten Vorrat dar, aus dem Tiere und Pflanzen das Material zu erneuertem Aufbau entnehmen. Die organisierten Körper erstatten diesem Vorrat das entlehnte Material in Form von Sekretionen, solange sie leben, nach ihrem Tode aber in Form von Verwesungsprodukten zurück. Der See ist eine Welt im kleinen, in der sich der Kreislauf von Inkarnation zu Auflösung stets wiederholt.

Dieser Mikrokosmos, um den von Prof. S. A. Forbes[1]) eingeführten Ausdruck zu gebrauchen, würde sich selbst auf lange Zeit genügen können, auch wenn er gegen die umgebenden Medien völlig isoliert wäre. Er steht aber in direkter oder indirekter Verbindung mit der Atmosphäre, mit dem umliegenden Festland, mit seinem Einzugsgebiet und durch seinen Abfluß mit dem Meer.

Der See reiht sich so als wichtiges Glied in den Entwickelungsprozeß des Lebens auf der Erde ein. Dieser Mikrokosmos gehört in die Welt und nimmt durch das in ihm herrschende thätige, interessante Leben darin eine bedeutsame Stelle ein.

Der See ist aber nicht nur in biologischer Hinsicht wegen seines individuellen Charakters, als scharf abgegrenztes Medium, in dem sich ein vollständiger Kreislauf von auseinander hervorgehenden Erscheinungen abspielt, ein Mikrokosmos. Er ist zugleich in physikalischer, chemischer, mechanischer und geographischer Hinsicht ein Individuum. Er ist allerdings weder räumlich noch zeitlich isoliert und steht mit den anderen Teilen der Erde, den Gewässern und der Atmosphäre, die ihn umgeben, in Verbindung. Allein in seinem Wasser spielt sich eine ganze Reihe von Erscheinungen, Entwickelungen, Transformationen, Ursachen und Wirkungen selbständig ab; er ist in physikalischer wie in biologischer Hinsicht ein Mikrokosmos.

---

1) S. A. Forbes, The Lake as a Microcosm. Bull. Peoria Scientif. Assoc. 25. Febr. 1887.

Hierfür, unter Verweisung auf das früher Gesagte, einige Beispiele.

Was die Zusammensetzung seines Wassers betrifft, so mischen sich im See die durch die Zuflüsse, seien es Flüsse oder Regen, herbeigebrachten verschiedenen Wassermassen, vereinigen sich und werden während ihres langen Aufenthalts im Seebecken zu einer einheitlichen Masse von Seewasser. Im Seewasser sind alle chemischen Unterschiede der beitragenden Gewässer verwischt und ausgeglichen. In thermischer Hinsicht findet zwischen Luft und Wasser Austausch statt; der See absorbiert Wärmestrahlen oder strahlt Wärme aus. Während aber die Gestirne, die ihm Wärme zustrahlen, auf- und untergehen, während der Raum, der die vom See ausgestrahlte Wärme aufnimmt, unbegrenzt ist, während die Atmosphäre, mit der er in thermischem Austausch steht, fortwährend sich erneuert und wechselt, stellt der See eine ruhende, unbewegliche Masse dar. Der Fluß, der ihn durchströmt, erneuert ihn so langsam, daß diese Erneuerung seiner Materie vor der stets wirksamen thermischen Thätigkeit des Sees verschwindet.

Es ist klar, daß die mechanischen Bewegungen des Sees auf sein Wasser beschränkt bleiben. In dieser Hinsicht herrscht in der begrenzten Wassermasse eines Seebeckens mehr Individualität, als in den unbegrenzten Räumen des Ozeans, dessen sämtliche Teile miteinander in Verbindung stehen und aufeinander wirken.

Auch in allgemein geographischer Hinsicht ist die Individualität des Sees scharf ausgeprägt. Der See ist ein inmitten des Kontinents isolierter Teil der Hydrosphäre, gleichwie eine ozeanische Insel ein im Meer isoliertes Stück Festland darstellt. Gleichwie die Insel mit dem Ozean, in dem sie liegt und mit den übrigen Inseln ihres Archipels Beziehungen hat, ebenso hat der See Beziehungen und Verbindungen mit dem umgebenden Festland und den benachbarten Gewässern. Die klimatische, physikalische, biologische Individualität der Insel tritt nicht stärker hervor, als diejenige des Sees. In jeder Hinsicht ist der See ein scharf charakterisiertes

geographisches Individuum. Jeder See ist ein Organ der Erde, jeder verdient eine monographische Bearbeitung, die die Thatsachen der allgemeinen Limnologie in das gehörige Licht setzt, die in ihm spezialisiert und individualisiert sind; gibt doch das Klima, die Höhe, die geographische Lage in einem bestimmten Kontinente jedem See sein besonderes Gepräge.

Möchten Naturforscher und Geographen die zahlreichen verschiedenen Seen unseres Planeten nach allen Richtungen methodisch untersuchen! Dann werden unsere Nachfolger im stande sein, eine vergleichende Limnologie zu schreiben, so eingehend, wie sie heute noch nicht geschrieben werden kann.

Anhang.

Programm für limnologische Untersuchungen.

Ich will in folgendem die geographischen, physikalischen und beschreibend naturwissenschaftlichen Beobachtungen kurz aufführen, die nach dem heutigen Stand der Wissenschaft an jedem See vorzunehmen sind.

I. Hydrographie des Sees. Beschreibung; Schilderung seiner geographischen Lage; Aufnahme seiner hydrographischen Karte; Angabe interessanter Einzelheiten des Bodenreliefs; Berechnung seiner morphometrischen Werte.

II. Geologie. Feststellung der Genesis des Sees und der geologischen Geschichte seiner Wanne; deren ursprüngliches Relief, bevor Erosion und Ablagerungen es modifiziert hatten; Geschichte der Metamorphosen, die der See im Laufe der Zeiten durchgemacht hat; alte Seestände.

III. Petrographie. Physikalische, chemische und mineralogische Untersuchung des gegenwärtigen Seebodens in seinen verschiedenen Regionen.

IV. Hydrologie. Untersuchung des Wasserhaushaltes, d. h. der Wasserzufuhr durch Flüsse und Regen und der Wasserabfuhr durch Verdunstung und Abfluß; Untersuchung der periodischen und aperiodischen Wasserstandsschwankungen, der Bewegungen des Wassers in Strömungen, Wellen, Seiches etc.

V. Klimatologie. Untersuchung der regionalen Bedingungen der Atmosphäre, der thermischen, hygrometrischen, anemometrischen etc. Bedingungen, die auf den See Bezug haben.

VI. Chemie. Chemische Zusammensetzung der Gewässer; Gehalt an festen und gelösten mineralischen und organischen Bestandteilen; ihre periodischen oder zufälligen, allgemeinen oder lokalen Schwankungen.

VII. Thermik. Typus des Sees, ob polar, temperiert oder tropisch; periodische und aperiodische thermische Schwankungen; Temperaturverhältnisse der littoralen, der pelagischen und der Tiefenregion; Gefrieren des Sees.

VIII. Optik. Durchsichtigkeit und Farbe des Wassers; Charakter derselben; periodische, aperiodische und lokale Schwankungen.

IX. Biologie. Faunen und Floren der littoralen, der pelagischen und der Tiefenregion; ihre Genesis.



Bibliographie.

Ich führe im nachfolgenden die Titel der wichtigsten Abhandlungen aus dem Gebiet der Seenkunde auf, soweit sie für die allgemeine Limnologie von Bedeutung sind.

Eine vollständige Bibliographie der gesamten Litteratur über Seen zu geben, ist mir unmöglich; eine solche würde allein für sich einen dicken Band füllen. Ich begnüge mich damit, einige Hauptwerke zu nennen, in denen der Leser Einzelheiten über die physische Geographie der Seen finden kann. Werke, die im Text des Handbuches citiert sind, erwähne ich hier nicht noch einmal.

I. Bibliographieen und zusammenfassende Darstellungen.

K. Zöppritz, seit 1887 H. Hergesell und E. Rudolph, seit 1891 E. Rudolph: Fortschritte der Geophysik. Abschnitt: Physik der Erdrinde. (Wagners Geographisches Jahrbuch VIII—XI, XII, XV, XVI, XVIII, XX.) Bringt die beste Uebersicht über die Fortschritte der Seenkunde mit ausführlichen Litteraturnachweisen, doch ohne Berücksichtigung der Biologie.

Litteraturbericht in Petermanns Mitteilungen, redigiert von A. Supan (seit 1885); bringt regelmäßig Referate über Abhandlungen aus dem Gebiet der Seenkunde.

Annales de Géographie de Vidal de la Blache, Gallois et de Margerie. Bibliographie der Limnologie im Juli-Heft jedes Jahres. Paris 1892 f.

Bibliotheca geographica. Herausgegeben von der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, bearbeitet von O. Baschin. Jedes Jahr erscheint ein Band (Bd. I mit der 1891 erschienenen Litteratur); ein Abschnitt bringt die neue limnologische Litteratur in bibliographischer Aufzählung.

W. Ule, Die Gewässerkunde in dem letzten Jahrzehnt. I. Die Seenkunde. Hettners geographische Zeitschrift V (1899), S. 434—456. Weitere Berichte über die Fortschritte der Seenkunde sollen folgen.

Bibliographie der limnologischen Thermik von Wm. Ripley Nichols. On the temperature of freshwater Lakes and Ponds Boston Soc. nat. hist. XXI, 53, 1881 (48 Nr.).
Bibliographie der Seiches bis 1892; in F. A. Forel, Le Léman II, 62. Lausanne 1895 (35 Nr.).
L'Année biologique de Delage. Paris 1897 sq. Vom II. Bande (1898) an findet sich im Kapitel: Distribution géographique von G. Pruvot eine Bibliographie der biologischen Limnologie.
Bibliographie der limnologischen Biologie von 1893—1898 in H. B. Ward, Studies of the Zoolog. Laboratory of the University of Nebraska. Nr. 30 und 31, Juni 1899, S. 261 f. (446 Nr.) (In dieser Bibliographie sind besonders die zahlreichen und interessanten Abhandlungen der amerikanischen Naturforscher auf dem Gebiete der Seenforschung verzeichnet.)
Bibliographie der Biologie der Schweizer Seen von O. Fuhrmann. Revue suisse de Zoologie IV, 536 sq. Genève 1897 (154 Nr.). — Bibliographie des Zooplankton der Schweiz von demselben. Ibid. VII, 687. Genève 1900 (432 Nr.).
F. Zschokke, Seenfauna. Bibliographie der schweizerischen Landeskunde IV, 6. Fauna helvetica. 2. Heft. Bern 1897.

II. Allgemeine oder einzelne Arbeiten.

Bodensee-Forschungen der wissenschaftlichen Kommission der Konferenz der fünf Uferstaaten zur Herstellung einer Bodenseekarte: in Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung. Lindau 1893 f.
Resultate der wissenschaftlichen Erforschung des Balaton-(Platten-)Sees, herausgegeben von der Kommission der Ungarischen Geographischen Gesellschaft. Wien 1897 f.
F. A. Forel, Le Léman. Monographie limnologique. 3 Bde. Lausanne 1892—1901.
A. Geistbeck, Die Seen der deutschen Alpen. Leipzig 1885.
H. Hergesell und R. Langenbeck, Untersuchungen an den Seen der Südvogesen. Geographische Abhandlungen aus den Reichslanden Elsaß-Lothringen, herausgegeben von G. Gerland. Stuttgart 1892, 1. Heft, S. 121—169.
A. Magnin, Les Lacs du Jura. Paris 1895.
H. R. Mill, The English Lakes. Geograph. Journal. London 1895.
Atlas der österreichischen Alpenseen, herausgegeben von A. Penck und Ed. Richter. Wien 1895 ff.
E. Richter, Seestudien (Pencks geographische Abhandlungen Bd. VI, Heft 2). Wien 1897.
A. Delebecque, Les Lacs français. Paris 1898.
G. K. Gilbert, Lake Bonneville. Monograph I. U. S. Geological Survey. Washington 1890.

J. C. Russel, Geological History of Lake Lahontan. Monograph XI. U. S. Geological Survey. Washington 1889.
A. Penck, Morphologie der Erdoberfläche II, 203—327. Stuttgart 1894.
W. M. Davis, On the classification of Lake Bassins. Proc. Boston Soc. of Nat. History XXI, 315, 1882.
E. Desor, De la physionomie des Lacs Suisses. Neuchâtel 1860.
W. Upham, Ueber die Klassifikation der Seen vergletscherter Gebiete. Proc. Boston Soc. Nat. Hist. 1891, XXV, 228.
G. K. Gilbert, The Topographic Features of Lake Shores. V. Ann. Rep. U. S. Geological Survey 1883/4, S. 75.
E. Richter, Die Temperaturverhältnisse der Alpenseen. Verhandlungen des IX. deutschen Geographentages. Berlin 1891. S. 189—197.
G. von Boguslawski und O. Krümmel, Handbuch der Ozeanographie Bd. II (von O. Krümmel), S. 1 ff. Stuttgart 1887. (Die Wellen.)
F. A. Forel, Matériaux pour servir à l'étude de la faune profonde du Léman. Bull. soc. vaudoise Sc. nat. 6 Serien, Bde. XIII—XVI. Lausanne 1874—1879.
A. Weismann, Das Tierleben im Bodensee. Lindau 1877.
P. Pavesi, verschiedene Abhandlungen über die pelagische Fauna der oberitalienischen Seen. In Rendiconti del R. Istituto Lombardo 1877—1888.
F. A. Forel, La faune profonde des lacs Suisses. Denkschriften der Schweizerischen naturforschenden Gesellschaft XXIX, 2. Lieferung. Basel 1885.
O. Zacharias, Die Tier- und Pflanzenwelt des Süßwassers. 2 Bände. Leipzig 1891.
P. Regnard, Recherches expérimentales sur les conditions physiques de la vie dans les eaux. Paris 1891.
O. Zacharias, Forschungsberichte aus der biologischen Station zu Plön. Berlin 1893 f.
C. Apstein, Das Süßwasserplankton. Kiel und Leipzig 1896.
Kurt Lampert, Das Leben der Binnengewässer. Leipzig 1899.
W. Ule, Die Seenkunde und ihre Bedeutung. Zeitschr. f. Gewässerkunde II. 1899. S. 55—61.

Sachregister.

Die fremden Worte sind kursiv wiedergegeben.